

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA VARIAÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA EM COMPARTIMENTOS**

**DANIEL BRANCO MELÃO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JUNHO DE 2009

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais  
À Maria

*A Obra Nunca Está Concluída*  
*Albert Camus*



## **AGRADECIMENTOS**

Após conclusão deste trabalho, destino este espaço para agradecer a todas as pessoas que me apoiaram e ajudar na realização desta tese.

Desta forma, as primeiras palavras de apreço destinam-se ao meu orientador, Professor Nuno Ramos pelo impulso e motivação dado no início do trabalho, e pela disponibilidade, dedicação e apoio dado ao longo do mesmo.

Um agradecimento especial aos meus pais, à Maria e a todos os colegas que de uma forma ou de outra me apoiaram e ajudaram ao longo destes 6 meses.



## **RESUMO**

A humidade relativa é um parâmetro importante na análise do ar interior, as suas variações são responsáveis por inúmeras situações, mais ou menos negativas, que afectam a vida dos utilizadores.

Logo torna-se essencial conhecer as formas de a poder controlar a fim de conseguir garantir a satisfação dos utilizadores em áreas como saúde, conforto, economia energética assim como evitar a degradação precoce dos materiais.

Face a isso, no Laboratório de Física das Construções – LFC, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, tem vindo a desenvolver-se vários estudos com o intuito de perceber como a inércia higroscópica pode controlar os teores de humidade no interior das habitações.

Esta dissertação segue essa linha de trabalho, tendo como finalidade a compreensão da forma como a inércia higroscópica dos materiais de revestimento pode influenciar o controlo das flutuações de humidade relativa e pressão vapor verificadas interiormente, para os períodos sazonais compreendidos entre as estações fria e quente e vice-versa.

Dessa forma foi desenvolvido um trabalho experimental a fim de avaliar esses pressupostos e assim, poder definir estratégias para poder melhorar os rendimentos dos materiais de revestimento ao nível da capacidade de controlo das variações de humidade relativa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Humidade relativa, Inércia higroscópica, Materiais de revestimento interior, Ventilação.





## **ABSTRACT**

The relative humidity is an important parameter in the analysis of indoor air, its variations are responsible for many situations, more or less negative, affecting the lives of users.

Therefore it is essential to know the ways of power control to achieve to ensure the satisfaction of users in areas like health, comfort, energy saving so as to avoid early degradation of materials.

Against this, the Laboratory of Physics of Buildings - LFC, Faculty of Engineering, University of Porto – FEUP, has to develop more studies in order to understand how the hygroscopic inertia can control the levels of moisture inside the housing.

This dissertation follows this line of work, view to the understanding of how the inertia of the hygroscopic coating material may influence the control of fluctuations in relative humidity and vapor pressure checked internally for seasonal periods between the seasons, hot and cold vice versa.

Thus an experimental work was conducted to evaluate these assumptions and thus able to define strategies to improve the income of a coating material to the level of capacity for monitoring changes in relative humidity.

**KEYWORDS:** Relative humidity, Hygroscopic inertia, Interior covering materials, Ventilation.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
 <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	 1
1.1. OBJECTIVOS .....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DO TEXTO .....	1
 <b>2. HUMIDADE E INÉRCIA HIGROSCÓPICA</b> .....	 3
2.1. A HUMIDADE E OS MATERIAIS POROSOS .....	3
2.1.1. A HUMIDADE DO AR .....	3
2.1.2. A HUMIDADE DOS MATERIAIS POROSOS .....	5
2.1.3. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE NOS MATERIAIS .....	9
2.2. A IMPORTÂNCIA DA HUMIDADE PARA OS UTILIZADORES DOS EDIFÍCIOS .....	9
2.2.1. INTRODUÇÃO .....	9
2.2.2. A INFLUÊNCIA DA HUMIDADE NO CONFORTO TÉRMICO E NA PERCEPÇÃO DA QUALIDADE DO AR .....	10
2.2.3. A INFLUÊNCIA DA HUMIDADE NA DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS E ELEMENTOS CONSTRUTIVOS .....	12
2.2.4. A HUMIDADE NOS EDIFÍCIOS E A SAÚDE DOS UTILIZADORES .....	15
2.2.5. A HUMIDADE E O CONSUMO DE ENERGIA NOS EDIFÍCIOS .....	16
2.2.6. LIMITES IDEAIS PARA A VARIAÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR .....	16
2.3. ALGUNS FACTORES QUE INFLUENCIAM AS CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS INTERIORES .....	17
2.3.1. UTILIZADORES .....	17
2.3.2. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO .....	18
2.3.3. CLIMA EXTERIOR .....	20
2.4. INFLUÊNCIA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS .....	23
2.4.1. INTRODUÇÃO .....	23
2.4.2. CICLOS DIÁRIOS .....	23
2.4.3. CICLOS SAZONAIS .....	28
2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 2 .....	31

<b>3. ESTUDO EXPERIMENTAL</b>	32
<b>3.1. INTRODUÇÃO</b>	32
<b>3.2. DESCRIÇÃO DA INFRA-ESTRUTURA LABORATORIAL DE ENSAIO</b>	32
3.2.1. CÂMARA CLIMÁTICA	34
3.2.2. CÂMARA DE FLUXO	35
3.2.2.1. Sistema de ventilação	37
3.2.2.2. Sistema de monitorização	38
3.2.2. MODELO LABORATORIAL REPRESENTATIVO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES	40
<b>3.3. TESTES INICIAIS À INFRA-ESTRUTURA DE ENSAIO</b>	43
3.3.1. CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS	43
3.3.2. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO	43
3.3.3. HIGROSCOPICIDADE DA CÂMARA DE FLUXO	46
3.3.4. INÉRCIA TÉRMICA DA CÂMARA DE FLUXO	47
<b>3.4. ENSAIOS INDICADORES DE INÉRCIA HIGROSCÓPICA</b>	49
3.4.1. MODELO DE ENSAIO	49
3.4.2. CICLO SAZONAL $N=0,17 \text{ h}^{-1}$	50
3.4.2.1. Câmara de fluxo vazia	50
3.4.2.2. Câmara de fluxo com três provetes de gesso cartonado no seu interior	51
3.4.2.3. Câmara de fluxo com um provete de gesso cartonado no seu interior	52
3.4.2.4. Comparação dos calores registados em cada um dos ensaios	53
3.4.3. CICLO SAZONAL $N=0,30 \text{ h}^{-1}$	55
3.4.3.1. Câmara de fluxo vazia	55
3.4.3.2. Câmara de fluxo com três provetes de gesso cartonado no seu interior	56
3.4.4. COMPARAÇÃO FINAL DE TODOS OS ENSAIOS	55
<b>3.5. ENSAIO DE INÉRCIA HIGROSCÓPICA COM BASE NA VARIAÇÃO DE MASSA DA AMOSTRA</b>	58
<b>3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 3</b>	61
 <b>4. APLICABILIDADE DO ESTUDO NOS PROJECTOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL</b>	 62
4.1. INTRODUÇÃO	62
4.2. ARQUITECTURA	62
4.3. MATERIAIS E REVESTIMENTOS	64

<b>4.4. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>69</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS .....</b>	<b>70</b>
<b>5.2. DESENVOLVIMENTO FUTURO DE INVESTIGAÇÕES NESTA ÁREA .....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Diferença entre o ar seco e o ar húmido .....	3
Fig.2 – Diagrama Psicométrico [1].....	5
Fig.3 – Esquema exemplificativo das fases constituintes de um material poroso [2],[3].....	6
Fig.4 – Processo de adsorção de água através dos poros.....	7
Fig.5 – Difusão de vapor em função do teor de humidade, <i>Philip &amp; de Vries (1957)</i> [ ].....	8
Fig.6 – Percurso típico de uma curva higroscópica [4].....	8
Fig.7 – Esquema ilustrativo dos mecanismos de transferência de humidade em meios porosos.....	9
Fig.8 – Percentagem de insatisfeitos relativamente ao conforto térmico, influência da humidade [5]..	10
Fig.9 – Intervalos limite de humidade e temperatura, para o conforto térmico, nas estações de Inverno e Verão [5].....	11
Fig.10 – Condições de temperatura e humidade que influenciam o crescimento de fungos na madeira [7].....	12
Fig.11 – Isopletras da espécie <i>Aspergillus restrictus</i> . Esquerda: Isopletras representativas da germinação de esporos. Direita: Isopletras do crescimento do micélio figura a partir de (Sedlbauer et al., 2002). [8].....	13
Fig.12 – influência dos picos de humidade no crescimento dos fungos ( em madeira de pinho), condições isotérmicas [9].....	13
Fig.13 – influência dos picos de humidade na deterioração dos materiais (em madeira de pinho), condições isotérmicas [9].....	14
Fig.14 – O efeito da humidade em vários parâmetros relacionados com saúde e qualidade do ar interior, (Simonson <i>et al.</i> , 2001) [14].....	17
Fig.15 – Produção de vapor função da actividade executada, com base na norma BS5925 (BSI, 1991). .....	18
Fig.16 – Esquema representativo dos vários sistemas de ventilação, incluído o híbrido [15].....	19
Fig.17 – Esquema de funcionamento de um sistema de aquecimento/ventilação, concebido para arquitectura bioclimática .....	20
Fig.18 – Atmosfera sob influência urbana [16].....	21
Fig.19 – Portugal Continental: zonas climáticas.....	22
Fig.20 – Esquema legendado da câmara de fluxo[17] .....	24
Fig.21 – Esquema ilustrativo do modelo experimental [17] .....	24
Fig.22 – Influência de vários materiais de revestimento na inércia higroscópica de um compartimento	25
Fig.23 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GC em ensaios MBV....	26
Fig.24 – Gráfico da relação ( $Ih, d, AMDR$ ) com delimitação das classes de inércia higroscópica diária propostas [17].....	27

Fig.25 – Nova classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base em ensaios MBV [17] .....	28
Fig.26 – Esquema ilustrativo do modelo experimental para estudo da inércia sazonal [16] .....	28
Fig.27 – Variação da pressão de vapor média diária, $n=0,5 \text{ h}^{-1}$ e gesso cartonado no interior da câmara de fluxo .....	29
Fig.28– Variação da pressão de vapor média diária, $n=0,5 \text{ h}^{-1}$ e gesso cartonado no interior da câmara de fluxo [16].....	29
Fig.29 – Variação da pressão de vapor média diária na configuração 7 [16] .....	30
Fig.30 – Representação da infra-estrutura de ensaio.....	33
Fig.31 – Interface do programa Fitoview para observação dos registos realizados nas câmaras climáticas [17] .....	34
Fig.32 – Câmara climática e painel de controlo .....	34
Fig.33 – Câmara de fluxo.....	36
Fig.34 – Pormenores das aberturas da câmara de fluxo.....	36
Fig.35 – Pormenores do sistema de ventilação, a) Bomba de extracção de ar, b) Ligação em “T” , c) Rotâmetros e d) Orifício de admissão de ar .....	37
Fig.36 – Pormenor do orifício de admissão de ar.....	38
Fig.37– Equipamentos constituintes do sistema de monitorização, a) Sonda, b) Registador de dados e c) Ligação das sondas ao registador de dados .....	39
Fig.38– Esquema ilustrativo da disposição das sondas no Interior da câmara de fluxo .....	39
Fig.39 - Ligação da câmara climática 2 à câmara de fluxo, pormenor da mangueira.....	40
Fig.40 – Variações médias mensais de temperatura e humidade relativa para várias localidades de Portugal .....	41
Fig.41– Variações médias mensais da pressão vapor para várias localidades de Portugal .....	41
Fig.42 - Variações médias mensais da pressão vapor para Porto e Lisboa .....	43
Fig.43 – Variação da temperatura registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática.....	44
Fig.44– Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática.....	45
Fig.45 – Variação da pressão vapor do ensaio IH3.....	47
Fig.46 – Variação da temperatura, para estudo da inércia térmica da câmara de fluxo .....	48
Fig.47– Programa definido na câmara climática 2, para realização de ensaio sobre inércia higroscópica sazonal.....	49
Fig.48 – Ensaio IH4, Câmara de fluxo vazia e $N=0,17 \text{ h}^{-1}$ .....	50
Fig.49 – Ensaio IH5, comparação com ensaio IH4 .....	52
Fig.50 – Ensaio IH6, comparação com ensaio IH4 e IH5 .....	53
Fig.51– Ensaio IH7, Câmara de fluxo vazia e $N=0,3 \text{ h}^{-1}$ .....	55
Fig. 52 – Ensaio IH8, comparação com IH7 e $N=0,3 \text{ h}^{-1}$ .....	56

Figura 53 – comparação entre os vários ensaios.....	58
Figura 54 – Modelo de ensaio para comparação de inércia de diversos materiais, segundo a variação de massa.....	59
Figura 55 – Gráfico comparativo da variação de massa dos vários materiais.....	60
Figura 56 – solução para aumentar o índices de inércia higroscópica, aumentando a área das paredes e alternando materiais.....	63
Figura 57 – solução para aumentar o índices de inércia higroscópica, aumentando a área das paredes e de tecto[18] .....	63
Figura 58 – Gráfico comparativo dos valores de MBV para diversos materiais de construção [20].....	66
Fig.59 – Sistema de ventilação sensível a picos de humidade [21].....	67
Fig.60 – Grelha com sensor integrado de humidade relativa [21].....	68
Figura 61 – Curva de funcionamento do sistema [21] .....	68
Fig. 52 – Ensaio IH8, comparação com IH7 e $N=0,3 \text{ h}^{-1}$ .....	56
Figura 53 – comparação entre os vários ensaios.....	58



## **ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)**

Quadro 1 – Efeito da humidade relativa na produtividade [6] .....	11
Quadro 2 – Classificação do crescimento de fungos em superfícies de revestimento [10].....	14
Quadro 3 – Consumo de energia para aquecimento, em diferentes condições de teste [13] .....	16
Quadro 4 – Valores de projecto da humidade absoluta exterior do RSECE:1998.....	22
Quadro 5 – Condições de ensaio [17].....	25
Quadro 6 – Classes de inércia higroscópica diária [17].....	27
Quadro 7 – Valores médio mensal máximo e mínimo relativos à pressão vapor, amplitude máxima anual.....	42
Quadro 8 - “set points” do ensaio de monitorização.....	44
Quadro 9 – Estudo comparativo do sistema de monitorização.....	45
Quadro 10 – Características do ensaio do estudo da higroscopicidade da câmara de fluxo.....	46
Quadro 11 – Características do ensaio do estudo da inércia térmica da câmara de fluxo.....	48
Quadro 12 – comparação de registos para os ensaios realizados com um $N=0,17h^{-1}$ .....	54
Quadro 13 – Maiores diferença de pressão vapor entre os ensaios realizados com um $N=0,17h^{-1}$ em cada um dos patamares de HR analisados .....	57
Quadro 14 – variações médias da massa dos provetes.....	60
Quadro 15– Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de alguns materiais [19].....	64
Quadro 16 – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de alguns materiais [19].....	65

## INTRODUÇÃO

### 1.1. OBJECTIVOS

O principal objectivo deste trabalho consistiu na apreciação do conceito inércia higroscópica relativamente aos revestimentos interiores dos compartimentos e o modo como esta influência o controlo dos índices de humidade relativa aí presentes. Ao longo deste trabalho foram ainda definidos alguns objectivos parciais, que se descrevem de seguida:

- Avaliar a informação relativa às consequências mais comuns do não controlo da humidade relativa no interior dos compartimentos;
- Definir um intervalo óptimo de humidade relativa a adoptar no interior dos mesmos que se adeque aos padrões de aceitabilidade dos utilizadores e que minimize as consequências mais graves;
- Avaliar os factores que mais influenciam a variação da humidade relativa no interior das habitações;
- Analisar o clima que se observa ao longo do ano em várias localidades do território português;
- Prever o efeito da inércia higroscópica, através de um estudo experimental que tem como objectivo a monitorização do ambiente interior de uma câmara de fluxo, que pretende simular um compartimento, e a forma como este é influenciado pelo clima exterior que é simulado através de uma câmara climática;
- Enumerar algumas soluções construtivas assim como sistemas de ventilação que conduzam a um melhor aproveitamento do efeito da inércia higroscópica no controlo da humidade relativa interior.

Desta forma, todos estes objectivos devem convergir para dar resposta às seguintes questões: é relevante a influência da inércia higroscópica no controlo das condições hígricas interiores? Haverá alguma solução para maximizar o seu efeito?

### 1.2. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DO TEXTO

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos:

- O primeiro capítulo (Capítulo 1) apresenta os restantes capítulos assim como os objectivos deste trabalho;
- O segundo capítulo (Capítulo 2) é referente ao estado da arte, onde é apresentado o parâmetro humidade, que é a referência para este trabalho, assim como as consequências

dos elevados níveis da mesma, são ainda definidos alguns factores definidores de humidade bem como intervalos de aceitação pelos utilizadores. Tudo isto com base em estudos levados a cabo por diversos autores, são ainda analisados dois estudos realizados no LFC-FEUP que visaram a compreensão da inércia higroscópica diária e sazonal;

- O terceiro capítulo (capítulo 3) é relativo ao trabalho experimental propriamente dito, sendo feita uma descrição do modelo experimental e dos equipamentos que o compõem, são descritos os ensaios de teste do equipamento assim como o ensaio base de análise de inércia higroscópica, por último são apresentados os resultados relativos ao ensaio base consequência das varias configurações testadas, realizando um estudo comparativo entre todos, é ainda feita a comparação da capacidade de retenção de água por diversos materiais de revestimento;
- No quarto capítulo (capítulo 4) são apresentadas algumas das aplicações que associadas ao estudo realizado podem ser adaptadas para os projectos de construção civil, estas podem estar relacionadas com a arquitectura, materiais de revestimento e sistemas de ventilação;
- O último capítulo (capítulo 5) apresenta as principais conclusões desta dissertação, bem como perspectiva alguns dos possíveis trabalhos a desenvolver no futuro.

## 2

## HUMIDADE E INÉRCIA HIGROSCÓPICA

### 2.1. A HUMIDADE E OS MATERIAIS POROSOS

#### 2.1.1. A HUMIDADE DO AR

A atmosfera consiste numa mistura de gases, exercendo cada um deles a sua própria pressão, designada de pressão parcial. A pressão parcial exercida por cada um dos gases é proporcional ao número de moléculas do gás presentes no volume da mistura gasosa considerado.

À medida que a água se evapora e se mistura com o ar seco, o vapor começa a exercer a sua própria pressão parcial, denominada de tensão de vapor de água. A pressão do ar aumenta, porque passa a ser igual à soma das pressões exercidas, tanto pelo vapor de água como pelo ar seco. A figura 1 é elucidativa disso mesmo.

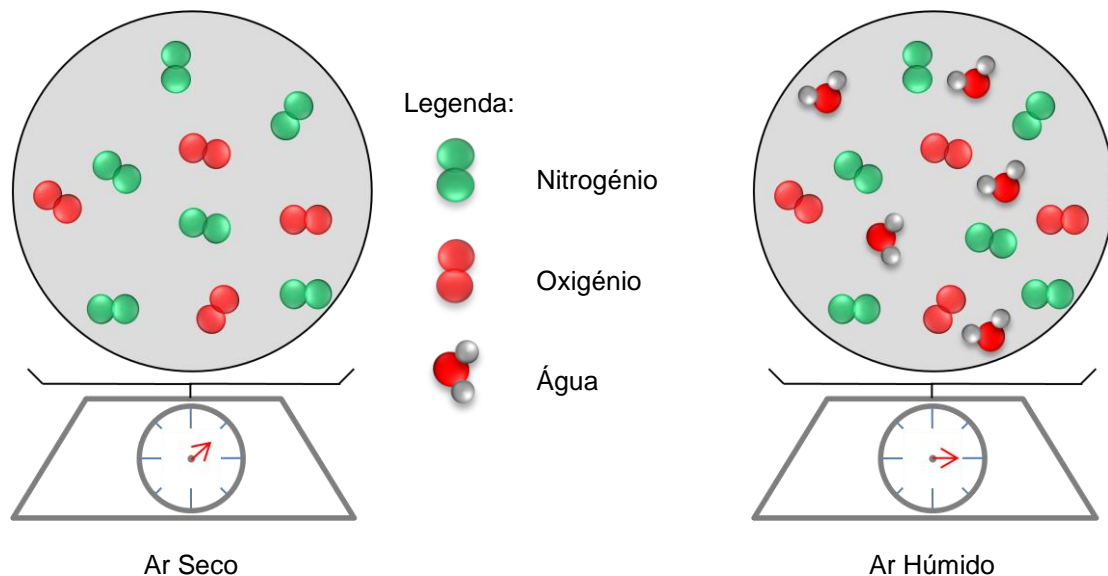


Fig.1 – Diferença entre o ar seco e o ar húmido

Esta mistura de gases tem assim um comportamento ideal, por isso é aplicável a lei geral dos gases para relacionar a pressão parcial de vapor no ar,  $p_v$ , e a concentração de vapor de água no mesmo,  $v$ , através da seguinte expressão (Hagentoft, 2001):

$$\frac{p_v}{v} = R_v \cdot (T + 273,15) \quad (1)$$

Onde a temperatura é expressa em °C e a constante universal dos gases relativa ao vapor de água,  $R_v$ , toma o valor de 461,4 J/(kg.K).

Existe, no entanto um limite para o qual o ar é incapaz de conter mais moléculas de água, sendo atingido aí o ponto de saturação, todavia, este valor está intimamente relacionado com a temperatura, e desta forma, as expressões (2) e (3) traduzem respectivamente os valores de pressão de saturação para temperaturas negativas e positivas.

$$p_{v,sat} = 611 \cdot e^{(82,9 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2881 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 4,403 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)} \quad , \quad -30^\circ C \leq T \leq 0^\circ C \quad (2)$$

$$p_{v,sat} = e^{\left(23,5771 - \frac{40429}{T + 273,15 - 37,58}\right)} \quad , \quad 0^\circ C \leq T \leq 80^\circ C \quad (3)$$

Posto isto, existe um parâmetro que relaciona a pressão vapor e a pressão de saturação de um mesmo ar, esse parâmetro é a humidade relativa,  $HR$ , é expresso em percentagem e o seu valor é obtido aplicando a expressão (6).

$$HR = 100 \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (4)$$

Uma outra grandeza, frequentemente, citada é a humidade absoluta,  $x_{ar}$ , esta corresponde à massa de vapor de água contida num metro cúbico de ar ( $g/m^3$ ), podendo então ser referida como a densidade de água num determinado ponto da atmosfera. A expressão (5), (Kalagasidis,2004), traduz o seu valor.

$$x_{ar} = \frac{0,621 \cdot p_v}{p_{ar} - 0,379 \cdot p_v} \approx 6,21 \times 10^{-6} \cdot p_v \quad (5)$$

Por último, e visto não haver necessidade de alongar muito mais este tema, resta referir uma propriedade característica do ar que muitas vezes é mencionada em trabalhos de térmica relativos à construção civil, o ponto de orvalho,  $T_{por}$ , que não é mais que a temperatura para a qual uma dada massa de ar atinge a saturação, sem que para isso se verifique variação de pressão vapor.

Em bibliografia sobre o tema é comum encontrar um gráfico que relaciona várias dos parâmetros que foram descritos, diagrama psicrométrico, figura 2. A título de exemplo, sabendo a temperatura e

humidade absoluta do ar facilmente se consegue aferir a pressão vapor desse mesmo ar, perante isto fica demonstrando o tão útil pode ser a utilização deste diagrama.

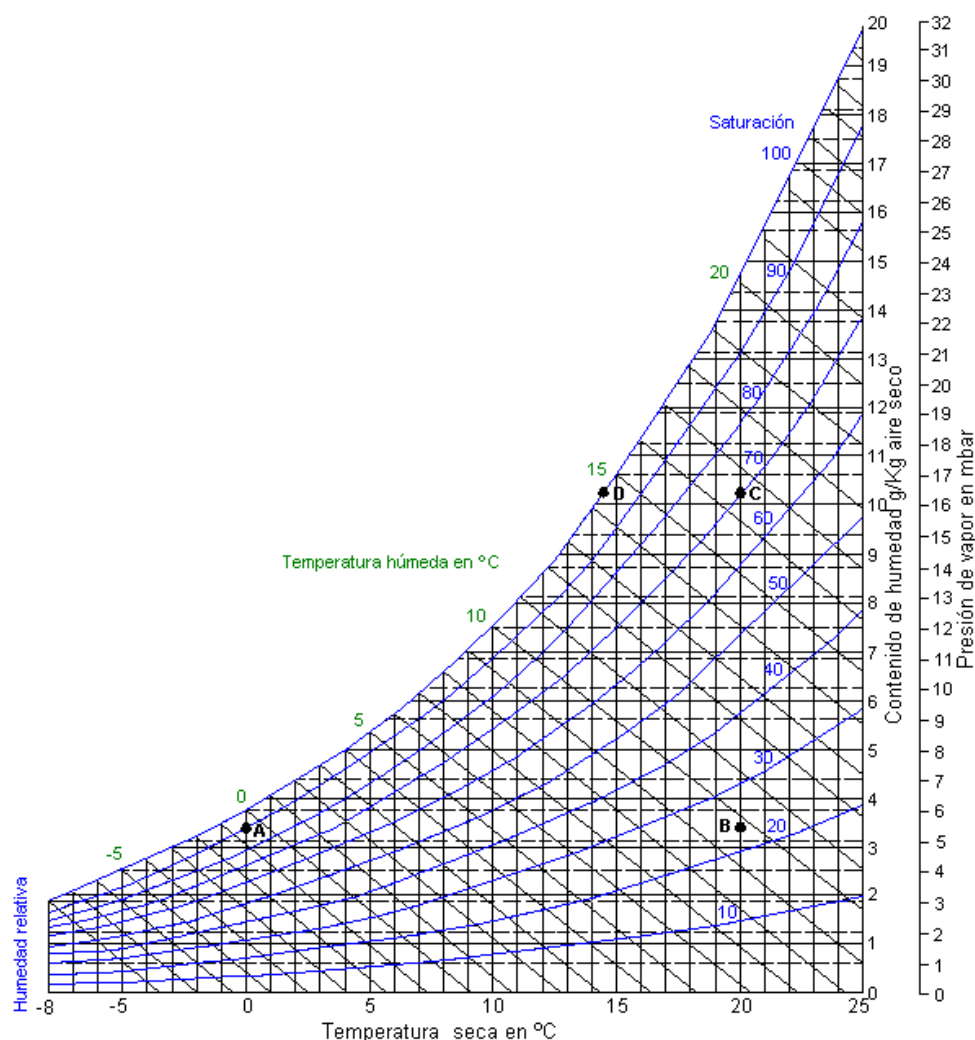


Fig.2 – Diagrama Psicométrico [1]

### 2.1.2. A HUMIDADE E OS MATERIAIS POROSOS

A maior parte dos materiais usados como revestimento interior, em construção civil, são porosos, e por isso são constituídos por três fases, (Couasnet, 1989), como está patenteado na figura 3.

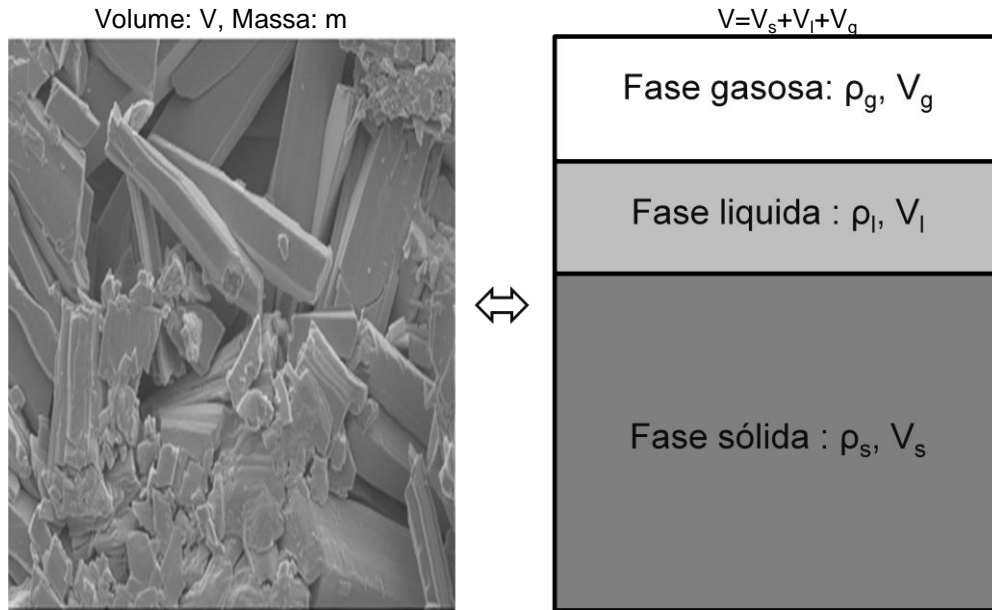


Fig.3 – Esquema exemplificativo das fases constituintes de um material poroso [2],[3]

Desta forma é fácil delimitar e definir cada uma das fases, assim:

- Fase sólida, correspondente à estrutura do material;
- Fase líquida, associada à água, livre e adsorvida, contida nos poros;
- Fase gasosa, relativa ao ar que ocupa o espaço sobran te dos poros;

Um dos possíveis parâmetros que pode interessar definir, face ao exposto, é o teor de humidade do material,  $u$  (kg/kg), definido pela expressão (7).

$$u = \frac{\rho_l \cdot V_l}{m} = \frac{m_{mat.} - m_{mat.seco}}{m_{mat.}} \quad (7)$$

Logo o teor de humidade é completamente dependente da fase líquida do material, e experimentalmente pode ser obtido, de forma simples, através da razão da diferença da massa do material,  $m_{mat.}$ , e a massa do material seco,  $m_{mat.seco}$ , pela massa do material.

Como é perceptível pela expressão este valor poderá variar entre o zero e um valor máximo, correspondente a os poros estarem repletos exclusivamente de ar ou de água, respectivamente.

A variação de valores relativos a este parâmetro está associada ao processo de adsorção de água pelos diversos materiais, logo à forma como esta se acumula nos poros. Este processo é influenciado pelas forças intermoleculares, ou de *Van Der Waals*, que actuam na interface sólido-fluído no interior dos poros (Freitas, 1992).

O processo inicia-se com a fixação de uma camada de moléculas de água nas paredes do poro, adsorção monomolecular, sobre esta irão acumular-se mais camada de moléculas de água, adsorção plurimolecular, a determinada altura, e devido ao estreitamento do poro vai estabelecer-se ligação entre as camadas plurimolecular, designada de condensação capilar, na figura 4 está representada esquematicamente cada uma das etapas.

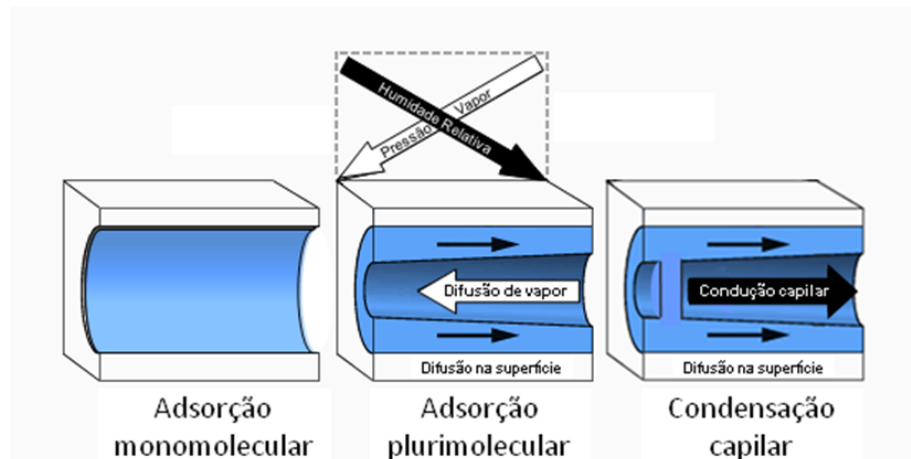
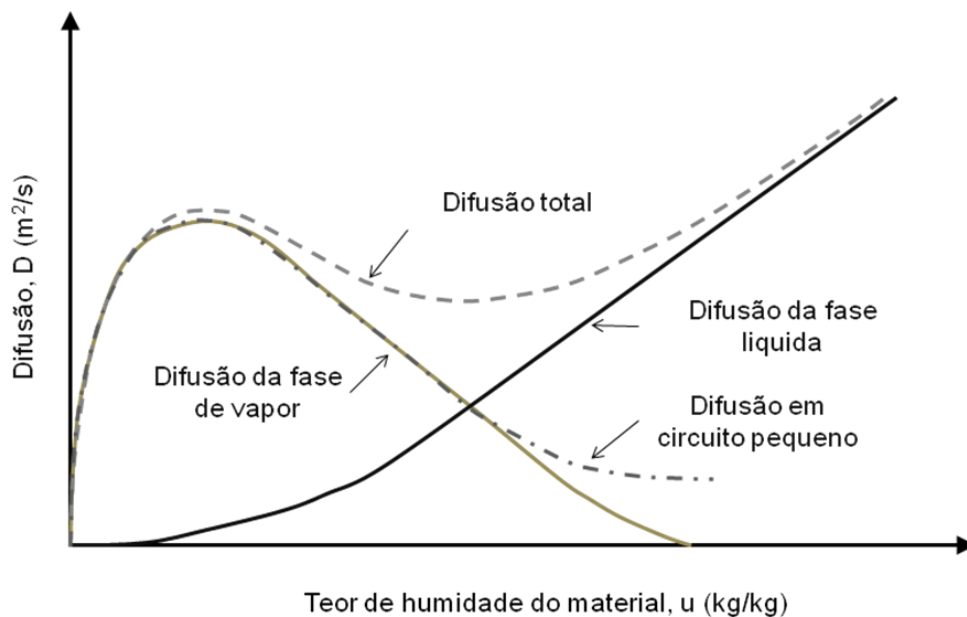


Fig.4 – Processo de adsorção de água através dos poros

A forma como o processo decorre foi descrito graficamente por *Philip & de Vries (1957)*, figura 5, onde se constata que o processo de difusão de água no poro é função do teor de humidade e corresponde à soma da difusão do vapor de água e a difusão da fase líquida, verificando-se que inicialmente a difusão total é apenas reflexo da fase de vapor e a partir do momento que a fase líquida começa a ter algum significado verifica-se um decréscimo da difusão total que atinge o seu mínimo quando a fase líquida iguala a fase de vapor. A partir do momento que a fase líquida é superior á fase de vapor verifica-se um crescimento da difusão total convergindo esta para o valor correspondente à fase líquida.

Fig.5 – Difusão de vapor em função do teor de humidade, *Philip & de Vries (1957)*



Após a descrição do processo de adsorção de água através dos materiais porosos, interessa também abordar o processo inverso, desadsorção, que apresenta algumas particularidades.

A mais importante prende-se com o fenómeno designado de histerese, figura 6, que se observa pela não coincidência das curvas de adsorção e de desadsorção dos materiais, situando-se esta última, sempre, acima da primeira. A maior diferença regista-se na 3ª fase, correspondente à condensação capilar, onde se verifica que o teor de água no início desta fase, em adsorção, é menor que o teor de água no final desta fase, em desadsorção. Logo poderá referir-se que há uma maior fixação de água, em adsorção, no material durante esta 3ª fase do que eliminação de água, em desadsorção, para a mesma etapa.

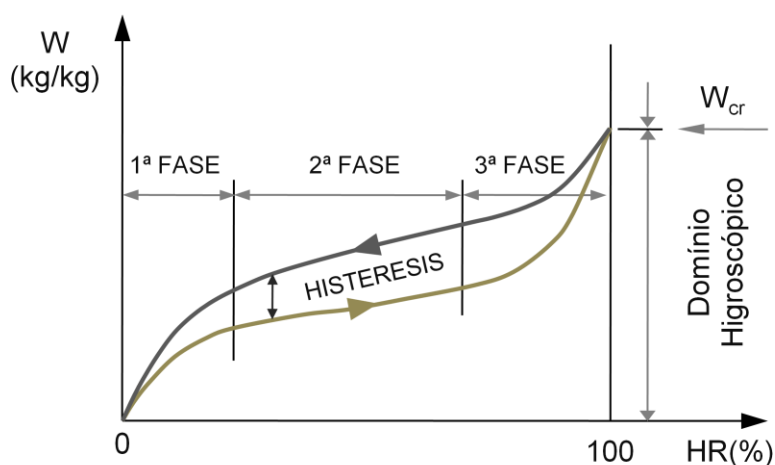


Fig.6 – Percurso típico de uma curva higroscópica [4]

### 2.1.3. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE NOS MATERIAIS

Os mecanismos de transferência de humidade nos materiais é um tema que se reveste de alguma complexidade, que para a realização desta tese, não terá muito interesse em ser aprofundado, contudo optou-se fazer uma descrição sumária de como decorre este processo.

Desta forma, e atendendo ao esquema apresentado na figura 7, onde são apresentados diferentes cenários de transferência de humidade nos materiais porosos, será feita uma breve descrição de cada um.

Assim e atendendo ao esquematizado para a primeira situação, verifica-se que devido ao baixo teor de humidade apenas se regista difusão do vapor. O segundo cenário refere-se à transferência em série de vapor e água líquida, correspondente a um teor de humidade crescente. Aumentando o teor de humidade novamente verifica-se a transferência em série associada com a difusão de superfície, terceiro esquema. Por último, na quarta caracterização observa-se a transferência pura de água líquida.

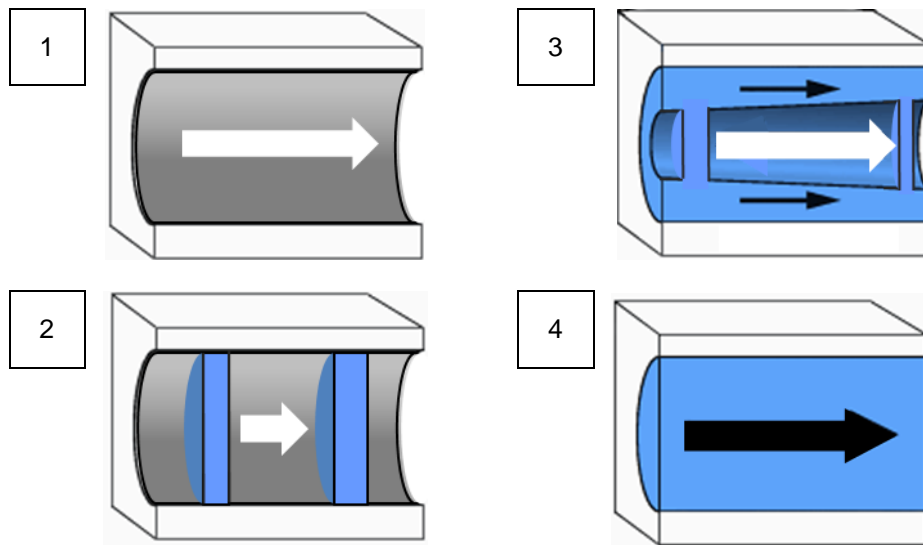


Fig.7 – Esquema ilustrativo dos mecanismos de transferência de humidade em meios porosos

## 2.2. A IMPORTÂNCIA DA HUMIDADE PARA OS UTILIZADORES DOS EDIFÍCIOS

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a preocupação com as características do ar interior é maior e global, pois para os utilizadores dos edifícios, as propriedades do mesmo podem influenciar positivamente ou negativamente a sua saúde, o seu conforto, o seu rendimento e até mesmo a sua economia.

Existem vários factores que podem condicionar a qualidade do ar, como é o caso da poluição, da humidade e temperatura. Nas seguintes subsecções procurará descrever-se a forma como a humidade pode influenciar a vida do utilizador, abordando para isso vários temas.

### 2.2.2. A INFLUENCIA DA HUMIDADE NO CONFORTO TÉRMICO E NA PERCEPÇÃO DA QUALIDADE DO AR

Relativamente ao conforto térmico, é importante definir todos os factores que influenciam a opinião do utente na sua apreciação, sendo estes de cariz ambiental e ocupacional.

Desta forma os factores ambientais compreendem:

- A temperatura do ar;
- A temperatura radiante média;
- A velocidade do ar;
- A humidade relativa.

Enquanto relativamente á ocupação tem-se:

- O nível de actividade;
- O tipo de vestuário.

Até ao momento ainda não se conseguiu estabelecer uma relação intrínseca entre a humidade e o conforto térmico, apesar dos vários estudos já realizados. Simonson *et al.* (2001) apresenta no seu

trabalho um estudo onde se confronta a humidade relativa e o conforto térmico, figura 8, sendo que o parâmetro temperatura também interfere nas conclusões.

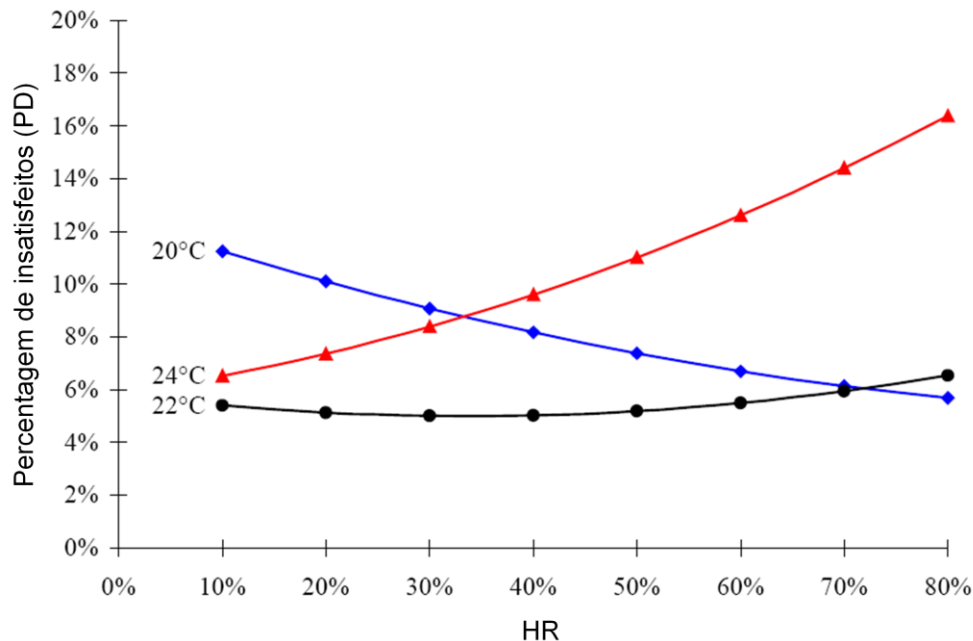


Fig.8 – Percentagem de insatisfeitos (PD) relativamente ao conforto térmico, influência da humidade [5]

Pelo apresentado verifica-se que a humidade relativa não é muito importante para o conforto térmico global, isto torna-se mais notório para a temperatura interior de 22°C onde o aumento de humidade pouco afecta a percentagem de insatisfeitos, PD. Apesar disso, quando a temperatura do ar é um pouco inferior, 20°C verifica-se um decréscimo da percentagem de insatisfeitos com o aumento da humidade relativa. Em sentido inverso quando a temperatura é de 24, a percentagem de insatisfeitos cresceu com o aumento da humidade relativa, superando os 10% de insatisfeitos para uma humidade relativa de 40%.

Apesar disso a norma ANSI/ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE, 1992) estabelece exigências ao nível do conforto humano, dando o devido relevo à humidade relativa. Na figura 9, são apresentadas alguns dos limites estabelecidos por esta, verificando que o limite máximo de humidade relativa pode variar entre os 60% e os 80% segundo o conjunto de critérios utilizado. No entanto, fica claro, que ambientes com níveis de humidade relativa muito alta ou muito baixa, são sinónimos de desconforto térmico e por isso devem ser evitados.

A diferença de limites de humidade relativa para a estação quente e fria é praticamente nula, verificando-se apenas e só diferença ao nível da temperatura.

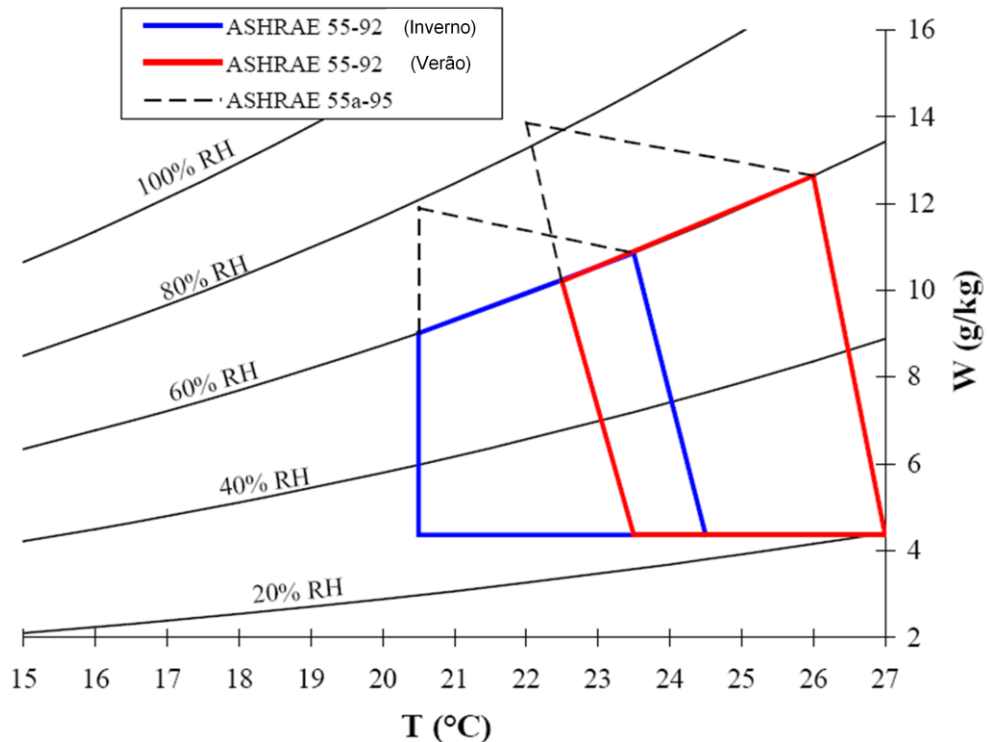


Fig.9 – Intervalos limite de humidade e temperatura, para o conforto térmico, nas estações de Inverno e Verão [5]

Uma das consequências do desconforto térmico é a baixa produtividade, e nesse sentido, são apresentados no quadro 1, os valores que demonstram como a humidade influencia a produtividade.

Quadro 1 – Efeito da humidade relativa na produtividade [6]

Humidade relativa (%) (temperatura de 25 °C)	Decréscimo de Produtividade (%)	Humidade relativa (%) (temperatura de 27 °C)	Decréscimo de Produtividade (%)
35	0,7	35	12,1
50	1,9	50	15,0
55	2,4	55	16,1
65	3,4	65	18,0
75	4,8	75	20,0

Observando o quadro, verifica-se desde logo que a perda de produtividade aumenta com o aumento dos níveis de humidade relativa e mais uma vez se observa que quanto maior for a temperatura maior influência da humidade relativa.

Assim e fazendo a comparação entre os valores de humidade relativa de 50 % e 75 % para uma temperatura de 25 °C verifica-se uma perda de produtividade próxima dos 3 %, enquanto, no mesmo intervalo mas para uma temperatura de 27 °C as perdas de produtividade aumentam 5 %.

### 2.2.3. A INFLUENCIA DA HUMIDADE NA DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS E ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Uma das consequências mais visíveis da existência de elevados índices de humidade nas habitações resulta da infestação das superfícies de revestimento por fungos.

Esta patologia é condicionada por vários factores, como são exemplo:

- A infestação do ar com esporos;
- A disponibilidade de humidade;
- A disponibilidade de nutrientes e de oxigénio;
- Condições de temperatura;
- Alcalinidade;
- Radiação;
- Movimento do ar adequado.

Sendo necessário a conjugação de todos eles para que a mesma ocorra. Mas dentro deste conjunto de factores a humidade assume um papel determinante para a ocorrência desta patologia.

A figura 10, mostra como a temperatura e a humidade relativa influenciam o crescimento de fungos em superfícies de madeira. Assim fica provado que os fungos podem crescer para variações de temperatura tão bastas, que podem ir dos 0°C aos 50°C, mas isto só ocorrerá se a humidade relativa for sempre, e no mínimo, superior ao 80%, verificando-se ainda que para temperaturas inferiores a 15°C a humidade relativa deverá ser tanto maior quanto menor for a temperatura.

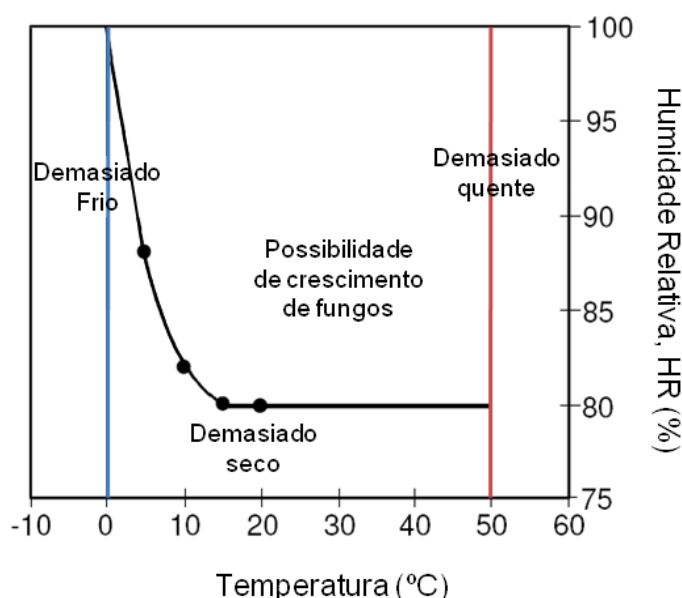


Fig.10 – Condições de temperatura e humidade que influenciam o crescimento de fungos na madeira [7]

Estes dois factores citados influenciam ainda o tempo de germinação dos esporos, agente patogénico dos fungos, assim como o processo de crescimento diário do micélio, parte estrutural dos mesmos, como se encontra patenteado pelas isopleias presentes na figura 11. Pela observação destas, constata-se que uma simples variação de humidade, próxima de 18% pode originar oscilações do tempo de germinação dos esporos que podem variar de 1 dia para 64 dias e crescimentos do micélio de 2mm diários para 0.01 mm diários.

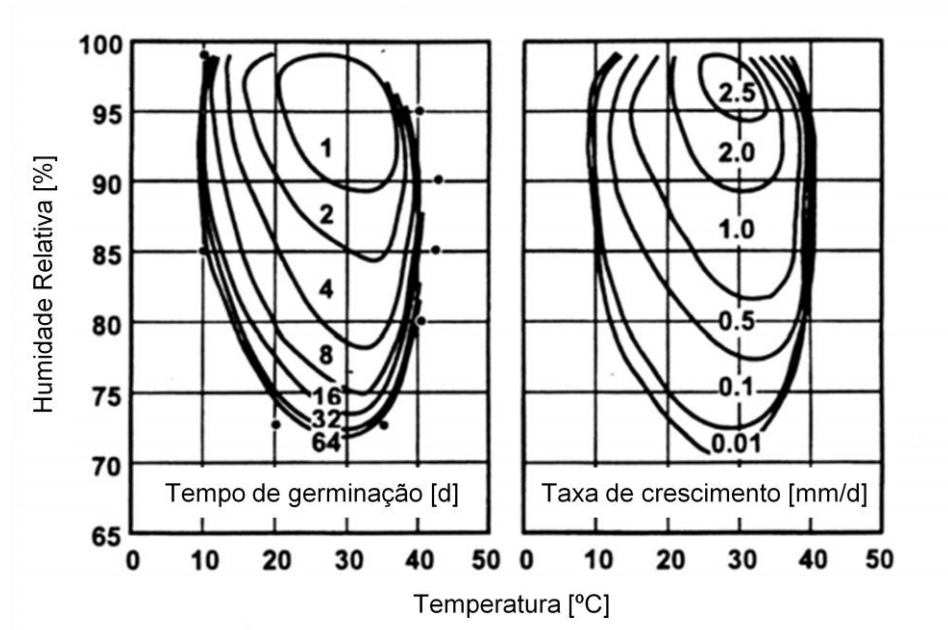


Fig.11 – Isopletas da espécie *Aspergillus restrictus*. Esquerda: Isopletas representativas da germinação de esporos. Direita: Isopletas do crescimento do micélio figura a partir de (Sedlbauer et al., 2002). [8]

Para além disto, outro factor associado à humidade pode ser determinante no desenvolvimento dos fungos assim como na deterioração dos materiais resultante disso, esse factor é o tempo de pico da humidade relativa. Assim, e para condições isotérmicas, são apresentadas na figura 12 e 13, os gráficos representativos disso mesmo.

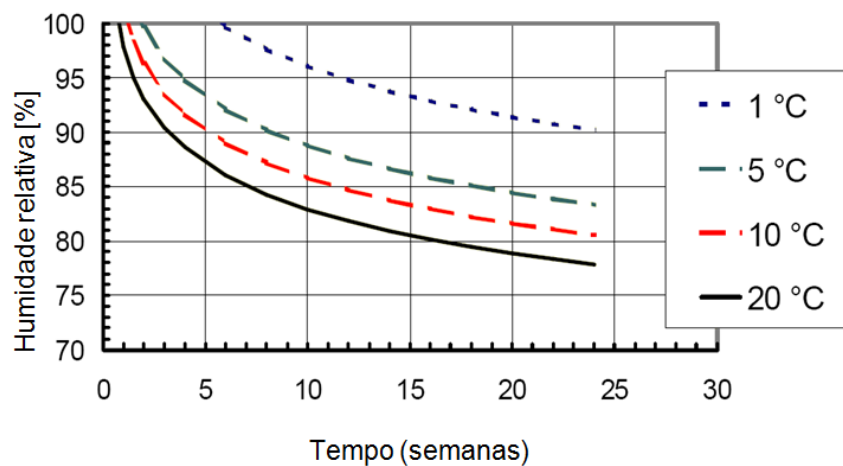


Fig.12 – influência dos picos de humidade no crescimento dos fungos (em madeira de pinho), condições isotérmicas [9]

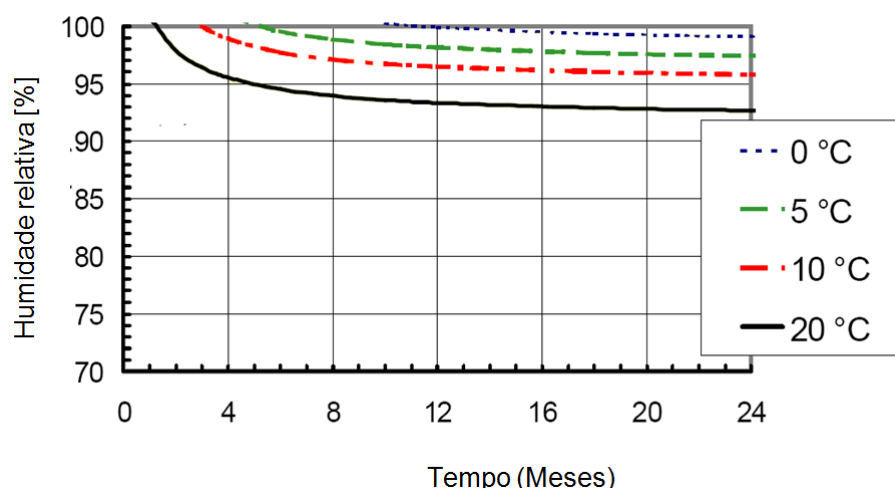


Fig.13 – influência dos picos de humidade na deterioração dos materiais (em madeira de pinho), condições isotérmicas [9]

Pela observação das figuras, e para uma temperatura próxima dos valores comuns do interior de habitações (20°C), verifica-se que bastam 2 semanas em que a humidade relativa se encontre nos 95% para potenciar o crescimento dos fungos enquanto o mesmo só se verifica para níveis de humidade próximos de 80% ao fim de 16 semanas.

Relativamente à deterioração do material, neste caso madeira de pinho, esta torna-se evidente ao fim de 5 meses para uma humidade relativa próxima dos 95% e nunca ocorrerá para níveis de humidade inferiores a 92%, isto também referente a uma temperatura de 20°C.

Alguns estudos revelam que os efeitos de pico de humidade só se tornam relevantes se os períodos secos forem curtos, caso contrário tornam-se negligenciáveis e o seu efeito perde-se com o tempo [9].

Em bibliografia sobre o tema é usual encontrar quadros de classificações do estado de crescimento dos fungos, como exemplo sugere-se a visualização do quadro 2.

Quadro 2 – Classificação do crescimento de fungos em superfícies de revestimento [10]

Visualização	Classificação	Crescimento de Fungos
Microscópica	0	Sem Fungos
	[0-1]	Vestígios de hifas encontrados em 1 de 5 pontos (microscópio, 40X)
	[1-2]	Vestígios de hifas encontrados em 2 de 5 pontos ou mais (microscópio, 40X)
"Olho nu"	[2-3]	Crescimento visível, em 0 - 33% da superfície da amostra
	[3-4]	Crescimento visível, em 33 - 66% da superfície da amostra
	[4-5]	Crescimento visível, em 66 - 100% da superfície da amostra

Por último, resta enumerar algumas das consequências mais comuns resultantes do crescimento e proliferação destes agentes microbiológicos, são elas:

- Deterioração dos materiais de revestimento;
- Libertação de esporos, agente patogénico múltiplo;
- Libertação de odores;

Deste modo fica demonstrado como se torna imperativo o controlo da humidade a fim de evitar este problema tão comum no interior de habitações.

#### 2.2.4. A HUMIDADE NOS EDIFÍCIOS E A SAÚDE DOS UTILIZADORES

Como foi referido na subsecção anterior a humidade relativa é um dos factores mais determinante para o aparecimento e desenvolvimento de fungos no interior das habitações.

Sendo os fungos potenciais agentes patogénicos, devido a libertação de esporos, são umas das causas mais comum para o aparecimento de certas doenças como micoses (superficiais, subcutâneas e sistémicas) e algumas alergias.

Para além dos fungos, a proliferação dos ácaros no interior das habitações está relacionada com os níveis de humidade relativa, assim, esta só ocorre em ambientes quentes e húmidos.

As condições óptimas para o seu desenvolvimento correspondem a temperaturas superiores a 20°C, altitude inferior a 1200 metros e humidade relativa superior a 70%, mas o seu aparecimento poderá acontecer para percentagens de humidade relativa inferiores a esse valor, mas sempre superiores a 50% [11].

Os ácaros não transmitem qualquer tipo de doença. Contudo, a exposição (sobretudo através das vias respiratórias) a determinadas proteínas que existem no seu corpo e excrementos, pode causar o aparecimento de doenças alérgicas [12], como são o caso de rinite alérgica, asma, sinusite, doenças de pele (ex. eczemas). Por isso quanto maior for o número destes organismos maior será a produção de detritos nocivos.

Alguns estudos também indicam que os elevados índices de humidade relativa podem ter consequências nefastas em relação à incidência de ataques cardíacos, isto é sempre conjugado com elevadas temperaturas.

Até ao momento têm vindo a ser descritas várias consequências ao nível da saúde humana, devidas à humidade relativa elevada, pois são os mais comuns de ocorrer no interior das habitações. Mas os problemas relacionados com humidade relativa baixa não devem ser descartados.

Assim e após diversos estudos chegou-se à conclusão que o limite mínimo para a prevenção do risco de infecções respiratórias se deveria fixar em 30%, sendo que as doenças e irritações que podem surgir de desrespeitar esse limite são:

- Mucosa do nariz e garganta secas, maior risco de infecções respiratórias;
- Sangramento do nariz;
- Tosse;
- Dificuldade em respirar;
- Dores musculares;
- Desidratação;
- Olhos secos, maior risco de conjuntivites;
- Agravamento dos sintomas de asma;



### 2.2.5. A HUMIDADE E O CONSUMO DE ENERGIA NOS EDIFÍCIOS

A humidade associada à forma de ventilação usada, no sentido de proceder ao seu controlo, pode relacionar-se com o consumo de energia.

Assim este consumo energético poderá estar associado aos gastos no sistema de aquecimento devido a má adequação da ventilação (ventilação exagerada que leva a perdas térmicas e consequente aumento do consumo energético), ou ainda aos gastos associados ao próprio sistema de ventilação (em sistemas de ventilação mecânica).

Nesse sentido vários estudos foram já realizados sendo no quadro 3, apresentados alguns dos resultados do estudo desenvolvido por Woloszyn et al. (2005), onde são apresentados as variações de consumo energético, consoante o tipo de ventilação, no mês de Fevereiro, época de aquecimento.

Quadro 3 – Consumo de energia para aquecimento, em diferentes condições de teste [13]

Número de zonas	Material com inércia higroscópica	Sistema de ventilação	Consumo de energia [kWh]	Diferença [%]
3 (portas fechadas)	Sim	RHC	767	0
3 (portas fechadas)	Sim	Constante	736	-4.05
3 (portas fechadas)	Não	Constante	735	-4.07
1	Sim	RHC	773	+0.78
1	Sim	Constante	737	-3.92
1	Não	RHC	757	-1.25

Através deste quadro verifica-se que o consumo energético é pouco influenciado pelos sistemas de ventilação sejam eles do tipo constante ou com fluxo de ar controlado pela humidade relativa (RHC), denotando-se mesmo assim um ligeira ganho próximo dos 4% se aplicada uma ventilação constante.

De qualquer das formas, torna-se mais evidente que se a habitação não dispuser de um sistema de ventilação, o consumo energético vai sofrer um maior aumento pois, procedendo apenas e só ao controlo da temperatura interior na época de aquecimento, e mantendo os níveis de humidade relativa, vai conduzir a uma percepção negativa da qualidade do ar, motivando os utentes da habitação a ventilar o espaço, sendo a abertura de janelas e portas a consequência mais comum de esse efeito, sendo que esse acto contribui para um maior dispêndio energético.

### 2.2.6. LIMITES IDEAIS PARA A VARIAÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

Após a descrição da forma como a humidade relativa influencia certos factores da vida dos utilizadores assim como do estado de conservação dos edifícios, seria interessante determinar limites mínimos e máximos para os níveis de humidade relativa a estabelecer no interior da habitação.

Para tal, é necessários conjugar todos os limites referidos nas subsecções anteriores e extrair os valores mais consensuais. Mas essa tarefa torna-se complicada, ainda mais, porque muitos desses intervalos são dependentes da temperatura.

Dessa forma, Simonson *et al.* (2001), apresenta no seu estudo um esquema gráfico onde relaciona vários parâmetros relativos à saúde e qualidade do ar interior em função da humidade relativa, figura 14.

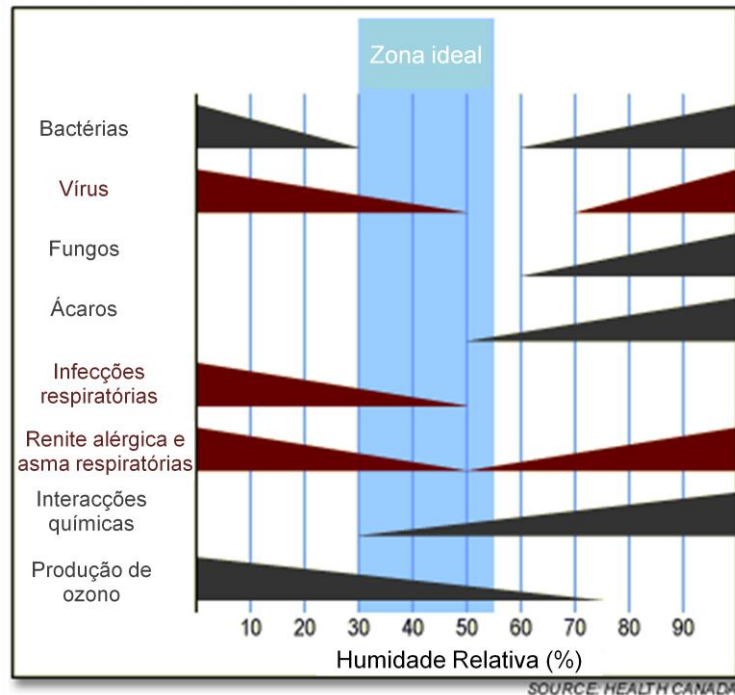


Fig.14 – O efeito da humidade em vários parâmetros relacionados com saúde e qualidade do ar interior, (Simonson *et al.*, 2001) [14]

Pela observação da figura pode-se referir o intervalo de 30% a 55% de humidade como sendo os limites ideais dentro dos quais deverá variar a humidade relativa no interior dos edifícios.

## 2.3. ALGUNS FACTORES DEFINIDORES DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

### 2.3.1. UTILIZADORES

Como são os utilizadores que podem controlar directa ou indirectamente vários dos factores que permitem alterar a humidade relativa presente num dado compartimento, interessa conhecer algum dos comportamentos dos mesmos e a forma como isso influencia em termos numéricos as variações de humidade relativa.

Assim, a produção de vapor associada às várias actividades desempenhadas, no interior da habitação, pelos utilizadores é dos parâmetros mais fáceis de quantificar. Na figura 15, está representada produção de vapor em função da actividade executada, este gráfico foi elaborado segundo os valores apresentados pela norma BS5925 (BSI, 1991).

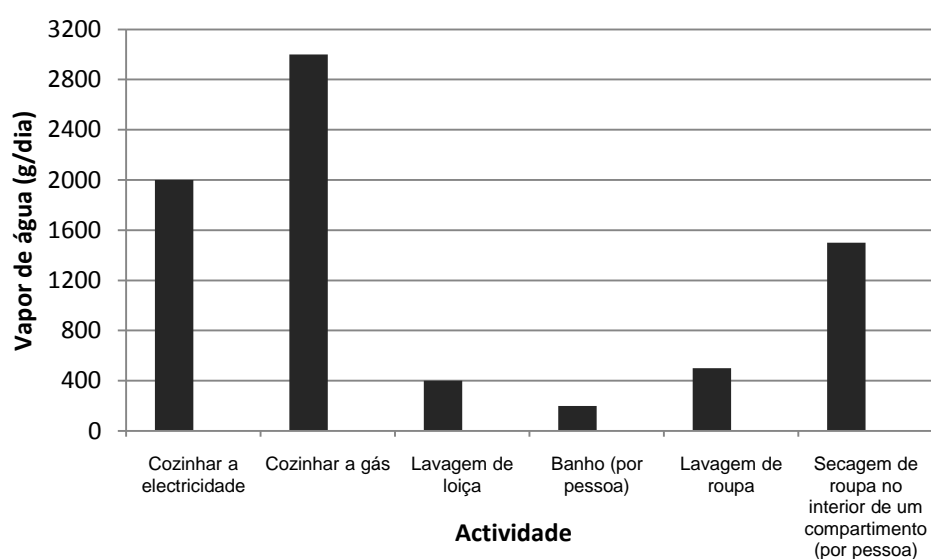


Fig.15 – Produção de vapor função da actividade executada, com base na norma BS5925 (BSI, 1991).

O mesmo não se pode dizer face ao comportamento dos utentes em relação ao controlo temperatura e ventilação do espaço.

Assim, e no que concerne ao controlo da temperatura, cada utilizador dependendo da sua preocupação com os gastos energéticos e custos energéticos associados, define os valores e formas de aquecimento do espaço, de modo independente.

Isto também se aplica ao modo como é processada a ventilação, onde é difícil definir de forma padronizada o comportamento dos utentes, visto as variações de comportamento face à mesma serem diferenciadas.

Em termos normativos, o regulamento de térmica RCCTE:2006 apresenta como referência uma temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento assim como o valor de 0,6 renovações por hora para garantir respectivamente o conforto térmico e a qualidade do ar.

### 2.3.2. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Como tem vindo a ser referido ao longo desta dissertação o controlo da ventilação revela-se um factor muito importante relativamente a definição do clima interior.

A forma como o utilizador pode proceder em relação à ventilação do espaço, é diversificada, como são exemplo os sistemas integrados de ventilação mecânica, sistemas de ventilação natural ou até mesmos por simples infiltrações onde o controlo do utente é praticamente nulo.

O sistema de ventilação mecânica é o que permite um maior controlo da taxa de renovação horária por parte do utilizador, mas devido aos custos iniciais mais elevados é o menos frequente em edifícios residenciais. Contudo a presença do mesmo em edifícios de escritórios e serviços é mais comum.

Em termos de ventilação natural o controlo do utente é menor, pois este apenas pode controlar a abertura ou fecho das grelhas de ventilação, esta ventilação resulta de diferenças de pressão causadas pela exposição ao vento e pelo efeito de chaminé derivado da diferença de temperatura interior-exterior.

Com este tipo de ventilação não se consegue assegurar em permanência uma taxa de renovação constante sendo totalmente dependente das condições climáticas.

Como factores influenciadores deste tipo de ventilação tem-se, segundo o RCCTE:2006:

- Classe de exposição ao vento;
- Estanquidade da envolvente;
- Classe das caixilharias dos vãos envidraçados;
- Área do envidraçado;

No cruzamento dos dois sistemas já referidos, surgiu mais recentemente um novo sistema de ventilação, designado de híbrido, este sistema aproveita as condutas e alguns componentes da ventilação natural, à qual é acoplada um equipamento mecânico que produz baixas pressões e que a assiste, de forma não permanente.

Este equipamento mecânico só entra em funcionamento quando é necessário sendo a sua activação normalmente controlado automaticamente por sensores de temperatura ou barómetro.

Desta forma os sistemas de ventilação híbrida reúnem as vantagens de fácil manutenção, menor consumo energético, maior conforto acústico e fiabilidade próprias da ventilação natural e maiores rendimentos de ventilação característicos da ventilação mecânica [15].

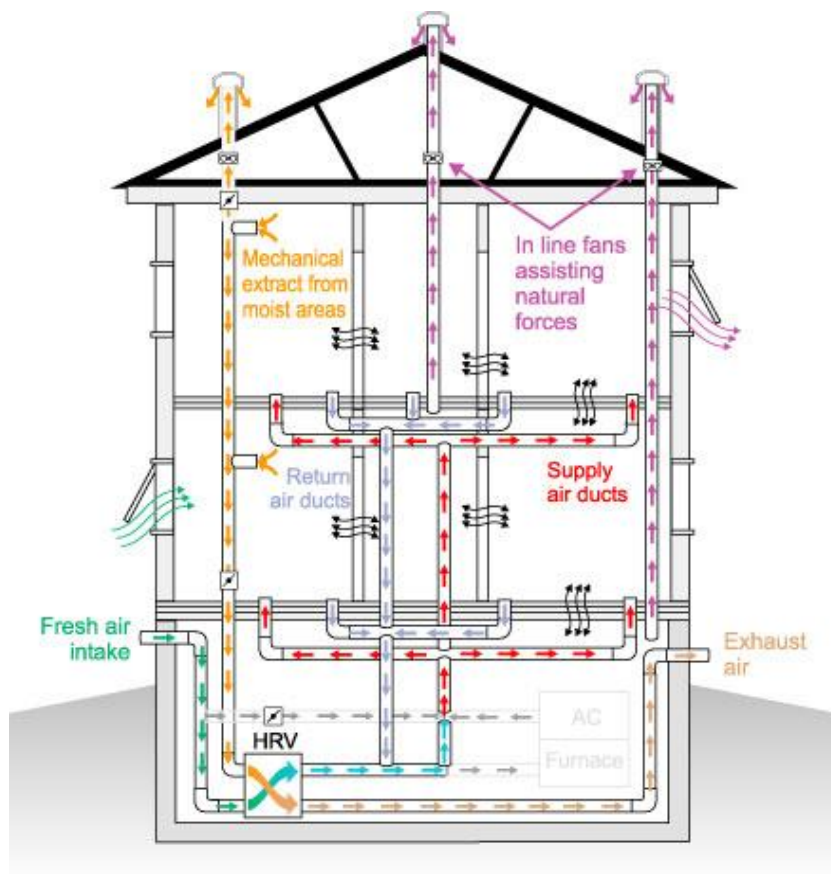


Fig.16 – Esquema representativo dos vários sistemas de ventilação, incluído o híbrido [15]

A necessidade de ventilar os edifícios tem o intuito na maioria dos casos, renovar o ar interior, que se encontra saturado e poluído decorrente da actividade humana, devolvendo-lhe as características que de uma forma ou de outra se aproximam dos padrões de aceitabilidade por parte dos utentes, a consequência maior de tal processo são as perdas energéticas, que segundo um estudo apresentado pela OCDE, pode atingir os 33% do consumo de energia para climatização.

Uma das formas de tentar diminuir esse valor, consiste como já foi referido na adopção de sistemas de ventilação híbridos. Outra poderá passar pela aplicação de um modelo que já é usado à alguns anos na arquitectura bioclimática, e consiste em enterrar uma rede de condutas de ar, de ventilação, num local adjacente ao edifício, figura 17, e como a temperatura do solo durante o inverno é superior à temperatura exterior as perdas energéticas tendem a ser menores. O mesmo sistema também permitirá a refrigeração da habitação durante o verão visto nesta estação a temperatura do solo ser inferior à temperatura do ambiente exterior.

Em termos de ventilação mecânica, um simples sistema de ar condicionado que permita controlar a temperatura e humidade em simultâneo, consegue fazer diminuir tais perdas.

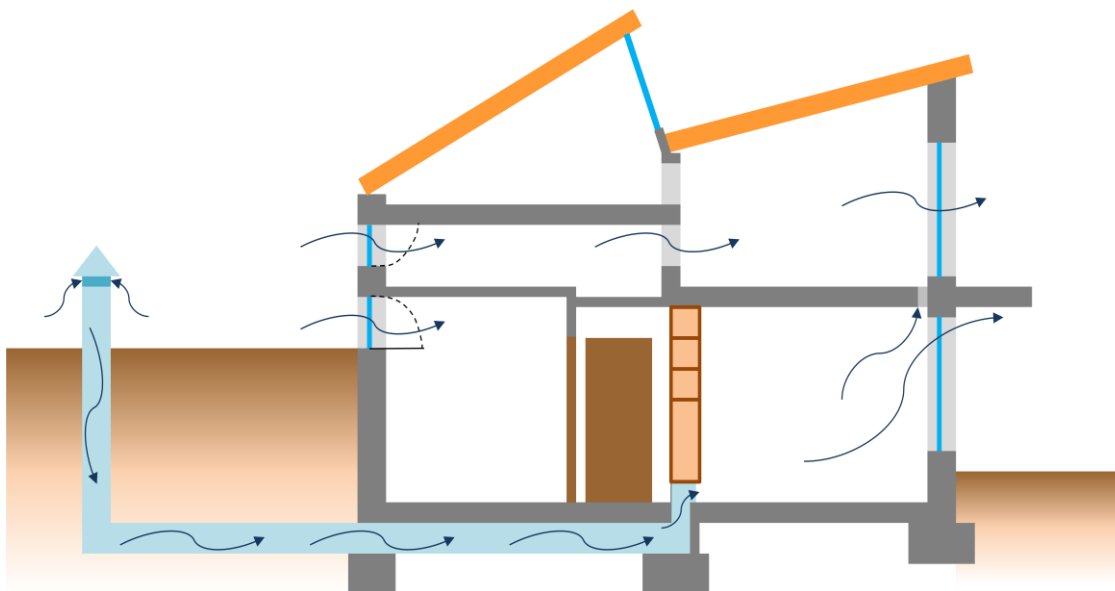


Fig.17 – Esquema de funcionamento de um sistema de aquecimento/ventilação, concebido para arquitectura bioclimática

Em termos regulamentares, o RCCTE:2006, admite como valor global da renovação horária de edifícios  $0,6 \text{ h}^{-1}$ .

### 2.3.3. CLIMA EXTERIOR

O clima exterior influencia directamente o clima interior, pois se a temperatura do ar exterior e a radiação solar influenciam a temperatura interior o mesmo se poderá dizer em relação à humidade relativa exterior que condicionam os valores de humidade relativa interior decorrentes do processo de ventilação. Desta forma, revela-se de primordial importância o conhecimento das características do clima do local.

O clima de Portugal é tipicamente mediterrâneo, embora a influência de factores como o oceano Atlântico/Continentalidade e o relevo, façam com que um país de reduzidas dimensões como Portugal apresente contrastes climáticos derivados precisamente da influência destes factores, dado que os mesmos vão provocar uma degradação das características tipicamente mediterrâneas. Assim, o clima mediterrâneo vai perdendo, em Portugal Continental, as suas características de Sul para Norte e do Litoral para o Interior.

Contudo o clima pode ser influenciado localmente por outros factores, um dos mais comuns está associado ao processo de urbanização, que cria um clima característico, denominado por “microclima urbano”, figura 18. Este factor apenas se torna importante para o estudo climático se não houver dados relativos às estações meteorológicas locais [16].

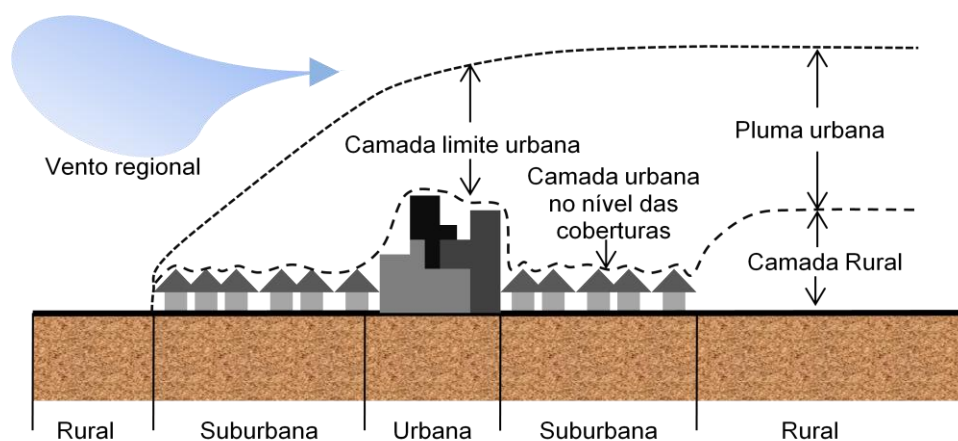


Fig.18 – Atmosfera sob influência urbana [16].

Devido à influência destes vários factores apresentados torna-se inevitável a caracterização sumária das condições climáticas verificadas em Portugal, assim como, revelar algumas das fontes importantes no tratamento de dados climáticos.

Desta forma atente-se à figura 19, onde são apresentadas as zonas climáticas de Portugal continental, relativamente às condições verificadas nas estações mais fria e quente, apresentadas pelo RCCTE: 2006.

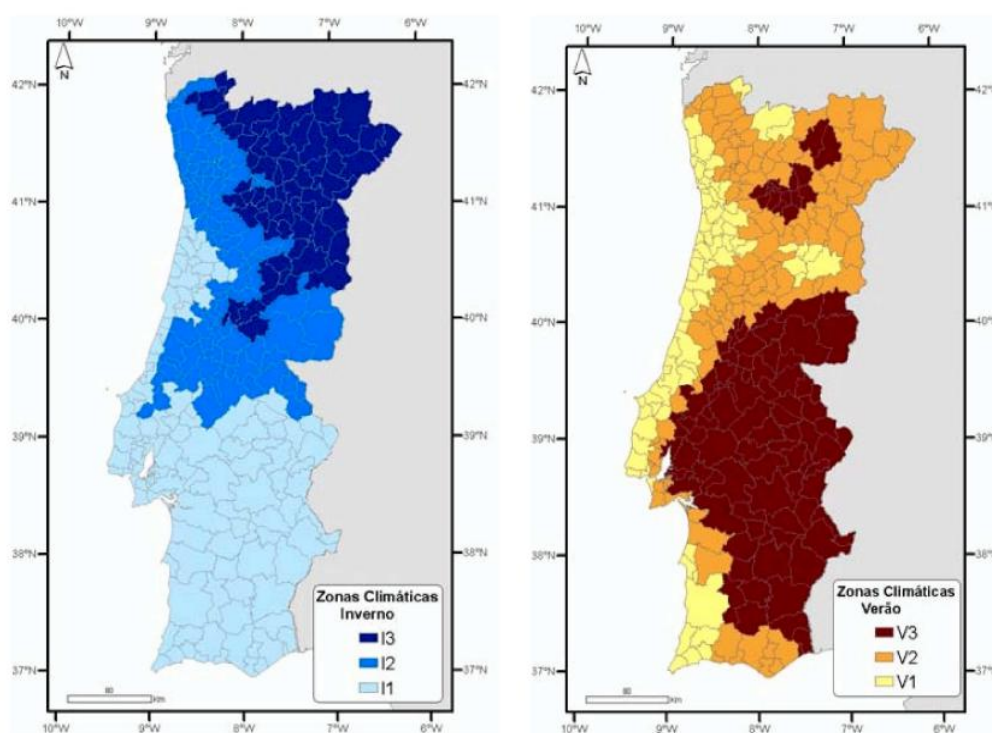


Fig.19 – Portugal Continental: zonas climáticas

Face a este zonamento, é fornecido no Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, RSECE:1998 um conjunto de valores de referência para o projecto de climatização, quadro 4.

Quadro 4 – Valores de projecto da humidade absoluta exterior do RSECE:1998

<b>Zona climática – Inverno</b>	I1	I2	I3	Açores	Madeira
<b>Humidade de projecto (g/kg)</b>	4	3	2	6	7
<b>Zona climática – Verão</b>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	Açores	Madeira
<b>Humidade de projecto (g/kg)</b>	10	11	10	14	14

Este tipo de dados, torna-se útil em determinados tipos de estimativas, mas não é adequado a simulações higrótérmicas detalhadas. Para tal é frequente a utilização dos dados horários facultados pelas estações climáticas presentes nos diversos locais, permitindo dessa forma um estudo concentrado de todas condições verificadas em variados períodos de tempo. Em Portugal regista-se apenas a produção de um Ano Climático de Referência para Lisboa (INMG/LNEC, 1988), em termos europeus por seu turno existe uma base de dados de referência, a “Test Reference Years” (TRY).

No caso de não existirem dados relativos aos anos climáticos de referência, pode-se utilizar programas como o METEONORM, que nos fornece anos climáticos de referência gerados com base em métodos estocásticos.

É de referir ainda, que a maior parte dos anos climáticos de referência existentes foram construídos para a análise do desempenho energético e não para a análise do desempenho higríco dos edifícios, o que resulta na falta de valores relacionados com a precipitação.

## **2.4. INFLUÊNCIA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS**

### **2.4.1. INTRODUÇÃO**

Até ao momento tem sido discutido os variados mecanismos, processos e causas relativos às variações registadas em termos de humidade relativa, no ambiente interior das habitações, por isso torna-se imperioso introduzir um novo conceito a esta dissertação, a inércia higroscópica.

A inércia higroscópica traduz a capacidade que um compartimento ou um edifício possui de armazenar a humidade em excesso do ar e restitui-la ao ambiente quando se verifica um défice de humidade no mesmo. Quando a avaliação é realizada a curto prazo, nomeadamente um dia, esta capacidade designa-se por inércia higroscópica diária, quando é realizada a longo prazo, designa-se por inércia higroscópica sazonal. Cada uma destas será abordada especificamente nas seguintes subsecções.

### **2.4.2. CICLOS DIÁRIOS**

Relativamente à inércia higroscópica diária, alguns estudos foram já desenvolvidos, mas o maior ênfase será dado ao estudo realizado por Ramos (2007), não só por ser o mais recente mas também por aportar novas ideias e conclusões relativas a este parâmetro.

Posto isto convém tentar perceber de forma sintetizada o estudo levado a cabo por este investigador, para a definição da inércia higroscópica diária e consequentes conclusões e resultados aferidos.

Desta forma, desenvolveu um equipamento laboratorial para estudo exclusivo desta propriedade, Câmara de Fluxo, figura 20, e definiu um modelo experimental esquematizado na figura 21 para alcançar tal objectivo.



Legenda:

- 1-Caixa em acrílico
- 2-Apoios metálicos
- 3-Aberturas circulares
- 4-Aberturas longidinais
- 5-Orifício de admissão de ar
- 6-Orifício de extracção de ar
- 7-Tubo de ligação à bomba de ar
- 8-Bomba de ar
- 9-Rotâmetros
- 10-Bomba peristáltica
- 11-Sistema de dispersão de humidade
- 12-Sondas
- 13-Registador de dados
- 14-Computador

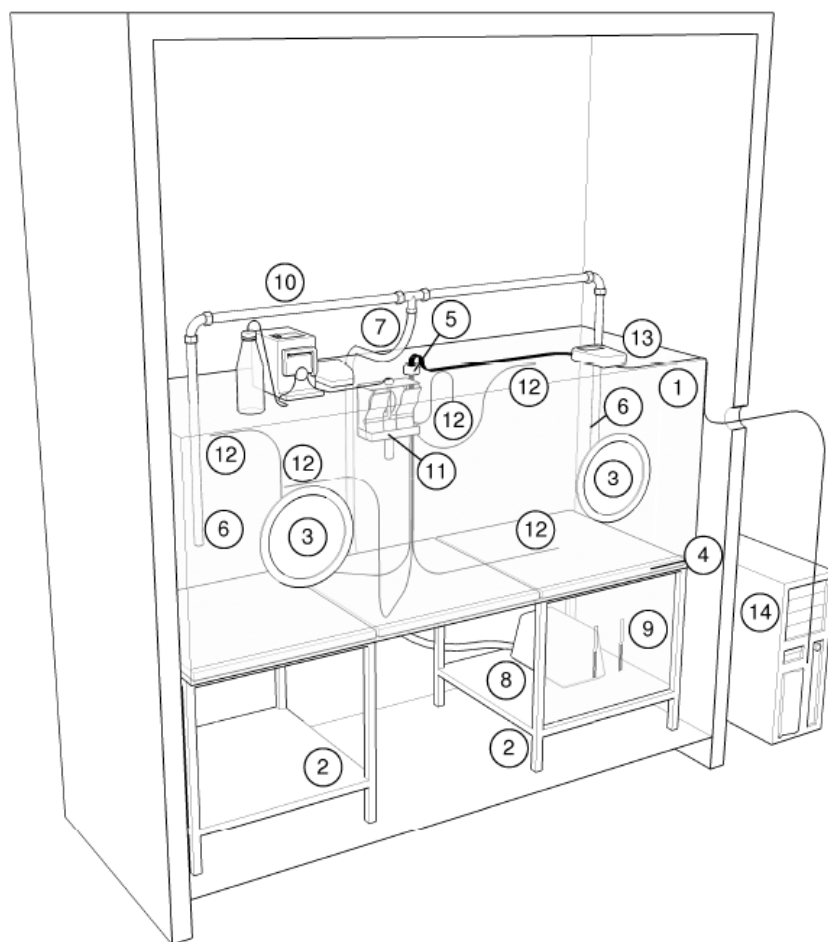


Fig.20 – Esquema legendado da câmara de fluxo [17]

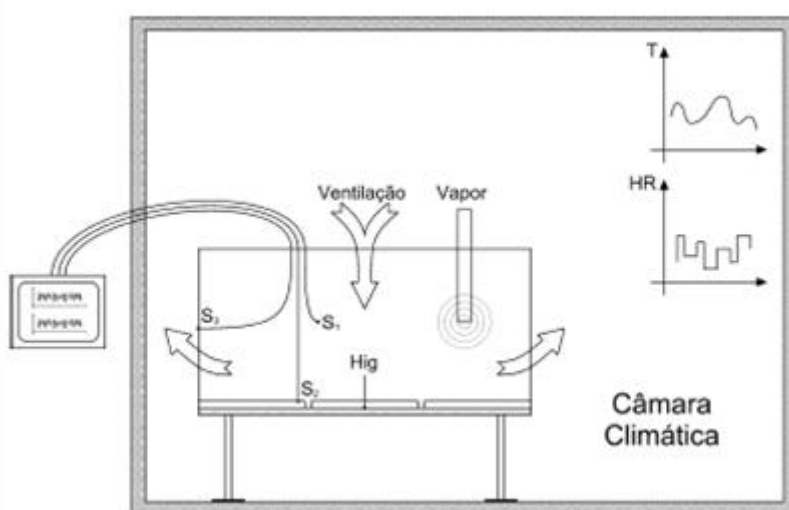


Fig.21 – Esquema ilustrativo do modelo experimental [17]

Este dispositivo experimental permite simular o comportamento higríco de um compartimento interior de uma habitação sendo possível para tal definir os valores dos parâmetros temperatura e humidade relativa e registar as variações observadas ao longo do tempo, assim como verificar a influência de diversos materiais de revestimento nas condições higroscópicas observadas.

Ao longo do estudo foram realizados vários ensaios demonstradores da influência dos materiais de revestimento na inércia higroscópica dos compartimentos, a título de exemplo surge-se a observação da figura 22, onde são apresentados os resultados relativos ao uso de vários materiais de revestimento.

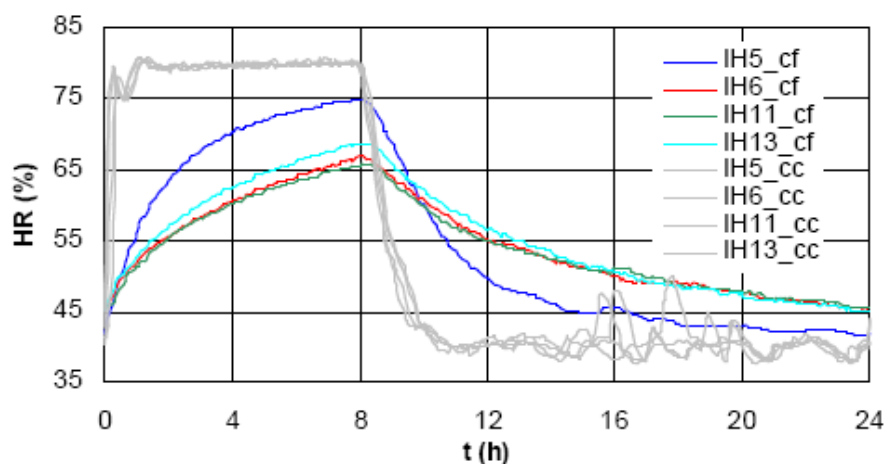


Fig.22 – Influência de vários materiais de revestimento na inércia higroscópica de um compartimento

Posto isto, e face aos resultados obtidos, verificou-se que os materiais de revestimento influenciam as condições higroscópicas interiores, como se constata pelo amortecimento dos picos de humidade relativa.

Apesar disso, os possíveis tratamentos das superfícies dos mesmos, com primários e tintas, tornam essa influência menos notória.

Para além deste tipo de ensaios demonstrativo da influência de inércia higroscópica, foram realizados ensaios do tipo MBV, “Moisture Buffer Value”, que consiste na variação de massa observada por superfície e correspondente à variação de humidade relativa, de forma sintetizada a capacidade do material absorver/armazenar a água da ambiência onde se encontra.

Para melhor compreensão do exposto observe-se alguns dos resultados obtidos, figura 23, obtidos para as condições apresentadas no quadro 5, e onde é analisada a influência de alguns dos tratamentos aplicados nas superfícies de gesso cartonado.

Quadro 5 – Condições de ensaio [17]

Ensaio	T (°C)	HR máx. (%)	HR mín. (%)	Ciclo teórico (h)	
1 (MBV)	23	75	33	8	16

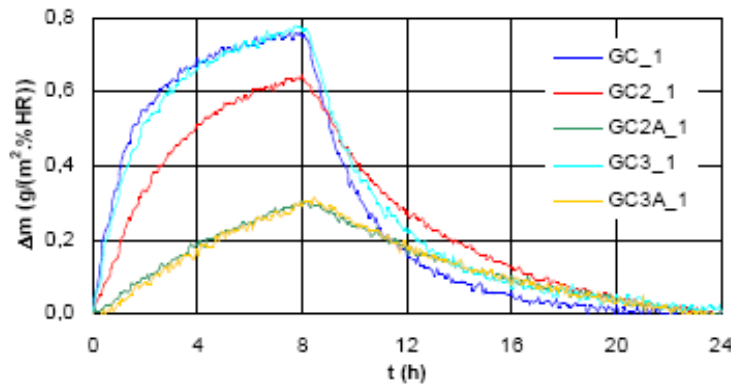


Fig.23 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GC em ensaios MBV

Pelo exposto, verifica-se de forma análoga aos resultados dos ensaios executados na câmara de fluxo, que os tratamentos impostos às superfícies de revestimento, influenciam negativamente a propensão do material absorver o vapor de água do ar que o contacta.

Face aos resultados obtidos experimentalmente, o autor executou simulações numéricas com fim comparativo com os ensaios experimentais e de forma a processar uma relação empírica entre a inércia higroscópica de um compartimento e o amortecimento da variação de humidade relativa, resultante da combinação dos restantes parâmetros higrotérmicos.

Assim surge a expressão de cálculo do índice de inércia higroscópica,  $I_{h,d}$ , expressão (6), função da soma dos produtos MBV.S, referentes a cada elemento construtivo diferente, das quantidades MBV<sub>obj</sub>, referentes aos objectos com capacidade higroscópica a contabilizar para o compartimento em análise [17], da taxa de renovação horária, N, da duração do período de produção de vapor, TG, e volume do compartimento, V.

$$I_{h,d} = \frac{\sum_i^n MBV_i . S_i + \sum_j^m MBV_{obj,j}}{N.V.TG} \rightarrow \left[ \frac{g}{m^3 . \% HR} \right] \quad (6)$$

Através da expressão (7) o mesmo autor relacionou o  $I_{h,d}$ , com a amplitude média diária relativa da variação de HR, AMDR, que permite quantificar o amortecimento produzido pelos revestimentos interiores em diferentes cenários higrotérmicos.

$$AMDR = \frac{1}{a + b.I_{h,d}^i} \quad (7)$$

Admitindo para as constantes, valores correspondentes a:  $a=0,00998$ ,  $b=0,0793$  e  $c=1,16$ , definiu uma curva matemática ( $I_{h,d}$ , AMDR) que permite definir quatro classes de inércia higroscópica diária, que possibilitam uma análise simples, mas sustentada, dos revestimentos a adoptar em edifícios, figura 24.

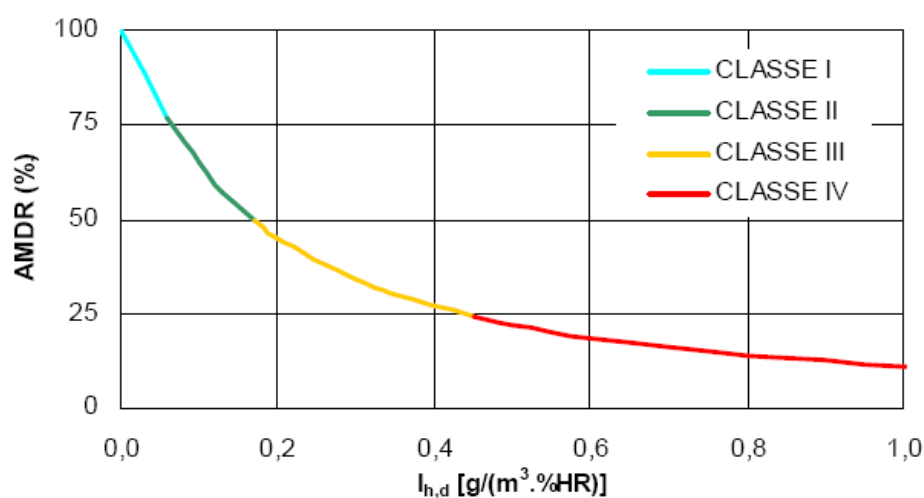


Fig.24 – Gráfico da relação ( $I_{h,d}$ ,  $AMDR$ ) com delimitação das classes de inércia higroscópica diária propostas [17]

No quadro 6, estão tabelados os intervalos correspondentes de  $I_{h,d}$  e  $AMDR$ , correspondentes a cada uma das classes de inércia.

Quadro 6 – Classes de inércia higroscópica diária [17]

Classe	Intervalo de $I_{h,d}$	Intervalo de $AMDR$
CLASSE I	$0 \leq I_{h,d} < 0,06$	$100\% \geq AMDR > \sim 75\%$
CLASSE II	$0,06 \leq I_{h,d} < 0,17$	$\sim 75\% \geq AMDR > \sim 50\%$
CLASSE III	$0,17 \leq I_{h,d} < 0,45$	$\sim 50\% \geq AMDR > \sim 25\%$
CLASSE IV	$0,45 \leq I_{h,d}$	$\sim 25\% \geq AMDR$

Para além desta nova idealização na caracterização da inércia higroscópica, no seu trabalho, Ramos (2007), com base nos valores, de  $I_{h,d}$ , resultantes da aplicação do revestimento correspondente em paredes e tectos de um compartimento de referência definiu novos intervalos MBV para a classificação dos materiais, figura 25.

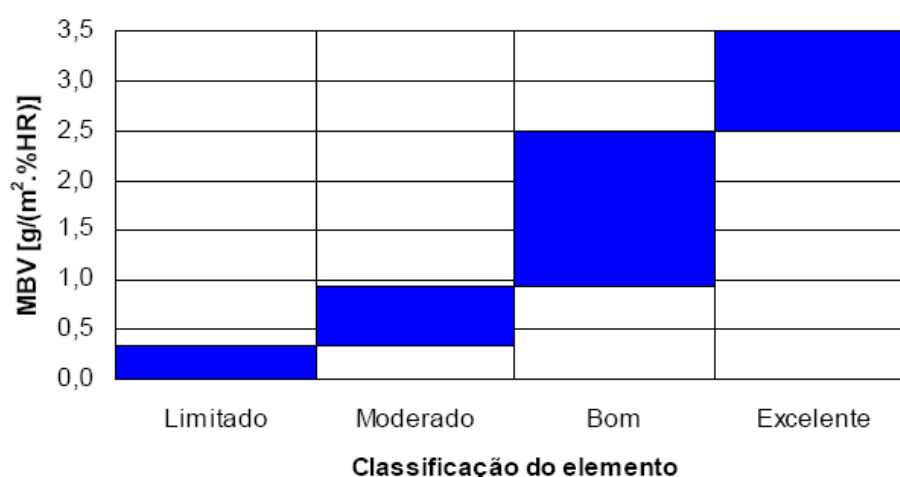


Fig.25 – Nova classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base em ensaios MBV [17]

Para tal considerou uma relação entre o volume e a área de aplicação de revestimentos de paredes e tectos de 0,7, num dado compartimento, um caudal de ventilação correspondente a uma renovação horária e um período de produção de vapor de 8 horas.

#### 2.4.3. CICLOS SAZONAIS

Em termos de inércia higroscópica sazonal, os estudos realizados ainda são em número diminuto, e da mesma forma que se caracterizou os ciclos diários, a referência nesta subsecção é relativa a um trabalho executado por Ferreira (2008), que realizou um estudo da importância da inércia sazonal em museus.

No seu modelo experimental, esquematizado na figura 26, usou a câmara de fluxo idealizada por Ramos (2008).

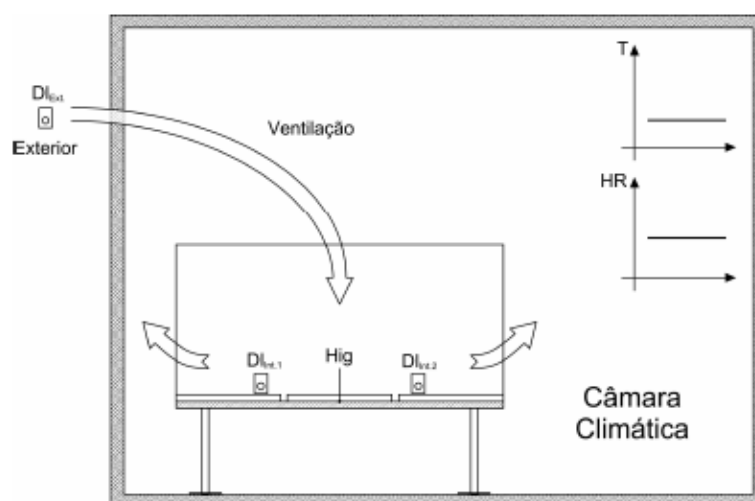


Fig.26 – Esquema ilustrativo do modelo experimental para estudo da inércia sazonal [16]

O estudo foi na sua essência de cariz experimental e os resultados obtidos, demonstraram a forma como a inércia higroscópica sazonal influencia a humidade relativa do ambiente interior.

Este modelo experimental tinha como principal inovação a ligação da câmara de fluxo ao exterior, desta forma o ar admitido tinha as características do ar exterior.

Deste modo, atente-se à figura 27, onde se verifica o funcionamento do modelo, constatando-se que os valores de pressão vapor da câmara de fluxo acompanham as variações das condições climáticas exteriores, quando este equipamento se encontra vazio.

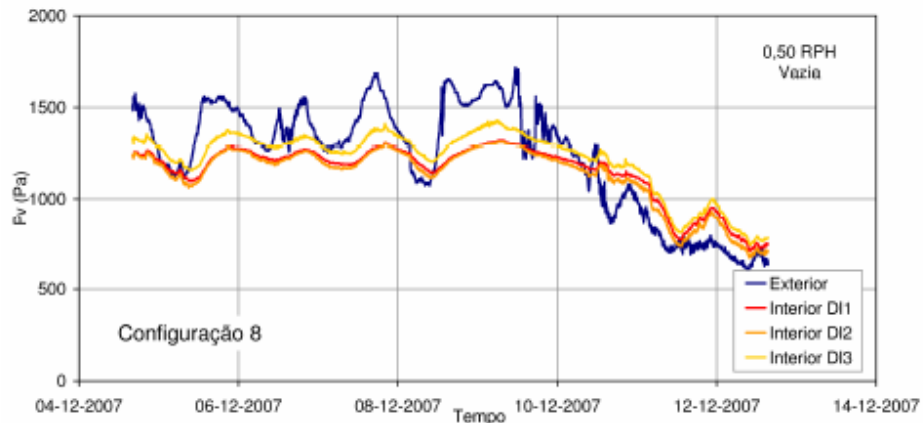


Fig.27 – Variação da pressão de vapor média diária,  $n=0,5 \text{ h}^{-1}$  e gesso cartonado no interior da câmara de fluxo

No estudo, o indicador desse fenómeno foi dado pelo amortecimento dos picos de pressão vapor, ao longo do tempo, como se pode observar pela observação da figura 28. Nesta está expressa a variação da pressão vapor média diária registada na câmara de fluxo para 0,5 renovações horárias e com provetes de gesso cartonado nela inseridos.

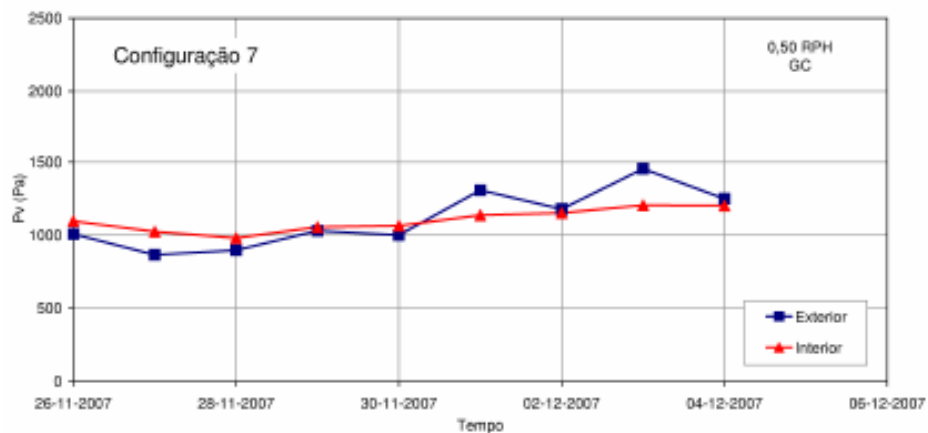


Fig.28– Variação da pressão de vapor média diária,  $n=0,5 \text{ h}^{-1}$  e gesso cartonado no interior da câmara de fluxo [16]

A mesma constatação foi aferida pela observação da variação da pressão vapor ao longo do tempo, figura 29.



Fig.29 – Variação da pressão de vapor média diária [16]

Pela observação das últimas duas figuras apresentadas constata-se, de forma evidente, o efeito da inércia higroscópica devido à inserção de gesso cartonado na câmara de fluxo. Este efeito é devido ao amortecimento, imposto pelos provetes inseridos, das condições verificadas exteriormente, isto relativamente à pressão vapor. Assim quando se verificam altas pressões vapor exteriormente, no interior observa-se que há amortecimento dos picos destas e dessa forma as variações de pressão no interior da câmara apresentam alterações mínimas pois o material que se encontra no seu interior tem a capacidade de absorver os excessos de pressão vapor observados. Ao invés quando no exterior as pressões vapor são mais baixas este material tende a restituir ao ambiente alguma da água que contem no seu interior a fim de amortecer os efeitos das baixas pressões observadas exteriormente.

Desta forma, e relativamente aos resultados apresentados, as variações de pressão vapor no interior da câmara de fluxo sofrem apenas ligeiras alterações denotam-se que o seu valor ronda os 1100Pa. Enquanto, ao nível da pressão exterior verificam-se oscilações entre os 800 Pa e 1700 Pa.

Após a verificação destes resultados as conclusões em termos práticos não diferiram muito das que foram apresentadas no estudo enunciado sobre os ciclos diários, desta forma ficou demonstrado que a aplicação de materiais higroscópicos aumenta a inércia higroscópica do compartimento em que são aplicados e que assim contribuem para o controlo das condições higrotérmicas interiores, nomeadamente da humidade relativa interior [16].

Assim como, que o armazenamento de humidade depende da capacidade de armazenamento de cada material, do mobiliário, da produção de vapor, do número de renovações horárias e da relação entre a área superficial do material e o volume de ar. Podendo-se tratar a capacidade de armazenamento de humidade ao nível do quarto/sala, dos sistemas e dos materiais.

Em termos de aplicações do estudo experimental, estas focam bastante o tema da conservação dos acervos museológicos. Assim e fazendo uma descrição geral das consideração a adoptar em termos arquitectónicos, pode referir-se que o sistema de ventilação deverá ser dimensionado de acordo com as necessidade, deverão reduzir-se ao máximo as perdas térmicas, assim como limitar os ganhos

térmicos, de forma manter condições de ambiência constante para diminuir ao máximo o risco de danificação dos objectos dos museus que são muito sensíveis a estas oscilações.

Em termos de ventilação esta deverá ser constante, e ser vocacionada para a preservação dos colecções que albergam, e não para gerar apenas conforto dos visitantes.

## **2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 2**

Neste capítulo foi feita uma breve introdução aos temas abordados ao longo da dissertação, começando por explicar alguns dos parâmetros definidores de humidade e tentar entender o modo como esta se comporta na interacção com os materiais porosos. Pois são todos esses mecanismos associados à estrutura microscópica do material que estão por de traz das características higroscópicas dos materiais.

Foi feita também referência a algumas das consequências mais comuns relacionadas com elevados índices de humidade, analisando alguns dos estudos que a relacionam com:

- O conforto térmico e a qualidade do ar;
- A degradação de materiais e elementos construtivos;
- A saúde dos utilizadores dos edifícios;
- O consumo energético.

Concluindo-se no final que este parâmetro não deveria ser superior a 55%. Foi ainda, feita a referência a uma limitação inferior, correspondente a 30% de humidade relativa, a fim de evitar desconforto e algumas doenças nos utilizadores.

Por fim foram analisados dois estudos já realizados nos Laboratórios de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LFC-FEUP, com o intuito de melhor conhecer o parâmetro inércia higroscópica, podendo desde já reconhecer se que esta pode ser responsável por um controlo mais ou menos efectivo da humidade relativa do interior das habitações.





# 3

## ESTUDO EXPERIMENTAL

### 3.1. INTRODUÇÃO

Um dos principais objectivos a desenvolver nesta tese consiste na avaliação da influência da inércia higroscópica sazonal na ambiência interior de compartimentos. Isto revela-se de primordial importância como ficou demonstrado na descrição elaborada no capítulo 2.

Desta forma, e como já foram desenvolvidos dois estudos no Laboratório de Física das Construções – LFC abordando este tema, decidiu-se utilizar o equipamento usado nos mesmos, implementando ligeiras alterações no modelo experimental. Assim, e na sua essência foram utilizadas 2 câmaras climáticas do tipo “walk-in” e uma câmara de fluxo, que são caracterizadas detalhadamente nas subsecções seguintes.

De modo introdutório, pode referir-se que a infra-estrutura laboratorial usada oferece um elevado nível de controlo dos parâmetros de ensaio, assim como facilidade de modificação da configuração dos mesmos e a possibilidade de repetição ilimitada [17], denotando-se uma versatilidade e eficiência ímpar no estudo da inércia higroscópica.

Aproveitando estas valências, tornou-se possível o estudo concentrado sobre a inércia higroscópica sazonal com especial ênfase para os períodos transitórios de estação fria/quente e vice-versa.

### 3.2. DESCRIÇÃO DA INFRA-ESTRUTURA LABORATORIAL DE ENSAIO

Como já foi mencionado, a infra-estrutura experimental usada para o desenvolvimento desta dissertação é composta por duas câmaras climáticas (1 e 2), sendo que na câmara 1 se encontrará uma câmara de fluxo que estará ligada à câmara climática 2 através de uma mangueira de PVC. A figura 30 representa esquematicamente o modelo experimental de ensaio.

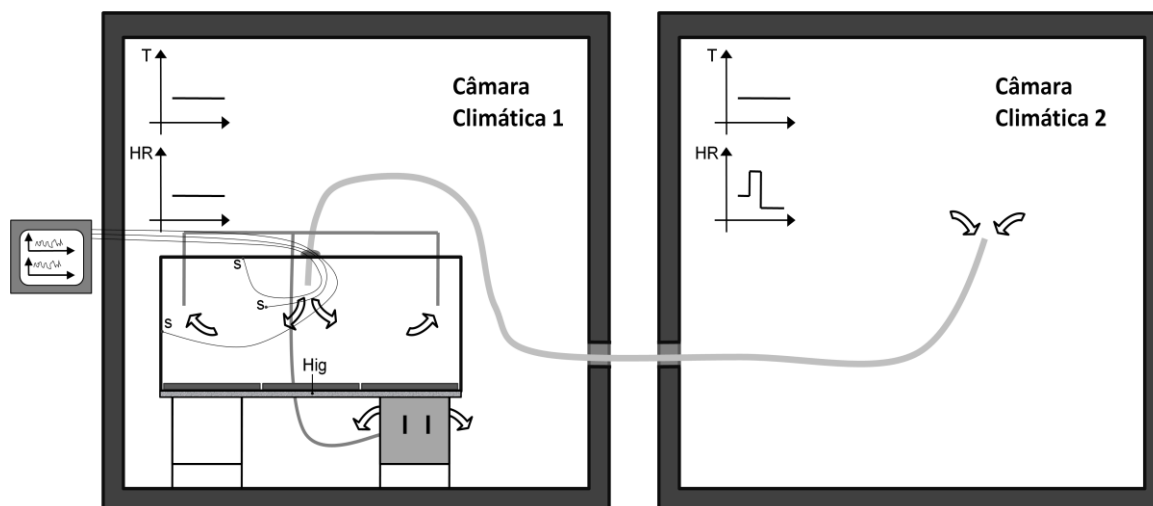


Fig.30 – Representação da infra-estrutura de ensaio

O modelo apresentado teve por base a consideração dos seguintes aspectos:

- A câmara de fluxo pretende representar um compartimento interior, sendo especialmente concebida para o estudo da inércia higroscópica, pois é possível avaliar a influência de diferentes revestimentos na variação da humidade relativa;
- A área para colocação dos provetes no interior da câmara de fluxo esta directamente relacionada com a relação real volume/área de revestimento de um compartimento de uma habitação;
- A renovação de ar da câmara é garantida pela extracção mecânica controlada efectuada por uma bomba;
- A entrada de ar é conseguida através de um orifício superior onde é possível introduzir a mangueira em PVC que liga à câmara climática 2;
- As câmaras climáticas possuem um quadro de controlo exterior onde é possível definir as condições de temperatura e humidade relativa pretendidas;
- A monitorização dos valores da temperatura e humidade relativa é conseguida com a introdução de sondas na câmara de fluxo, com registo contínuo;
- O registo das condições presentes nas câmaras climáticas é processado através de sensores pertencentes à própria, sendo arquivados em computador através da interface Fitolog.

### 3.2.1. CÂMARA CLIMÁTICA

Para a realização de ensaios laboratoriais, da forma idealizada, foi necessário usar as duas câmaras climáticas existentes no LFC-FEUP, figura 31.



Fig.31 – Câmara climática e painel de controlo

Estas câmaras são da mesma série – Fitoclima 3600 EDTU do tipo “walk-in” e têm como principais características:

- Volume de 3600 litros;
- Quadro de controlo exterior, com ecrã tátil individual;
- Capacidade de produzir variações de temperatura entre os +15°C e os + 35°C, com uma precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ;
- Capacidade de gerar uma gama de valores de humidade relativa entre 30% e 90%, com uma precisão de  $\pm 2\%$ ;
- Possibilidade de programação de ciclos de variação de temperatura e humidade relativa;

Apesar de apresentarem as mesmas características, as funções destinadas a cada uma delas são distintas. Assim, a câmara 2 terá como principal objectivo tentar reproduzir condições de pressão exterior.

A câmara 1 ficará num estado estável relativamente a estes parâmetros, proporcionando não só um mecanismo definidor das condições ambientais iniciais da câmara de fluxo, que se encontra no seu interior, assim como demonstrando a dependência/independência que possa haver entre esta última e a câmara que a envolve. Deste modo, foi definido a temperatura de 23°C e humidade relativa de 50% como os valores de estabilização deste equipamento.

O registo dos valores de cada um dos parâmetros programáveis neste tipo de câmaras é processado pelo programa Fitolog, instalado num computador anexo a este equipamento, sendo também nele possível a visualização gráfica, em tempo real, dos valores recolhidos, figura 32.

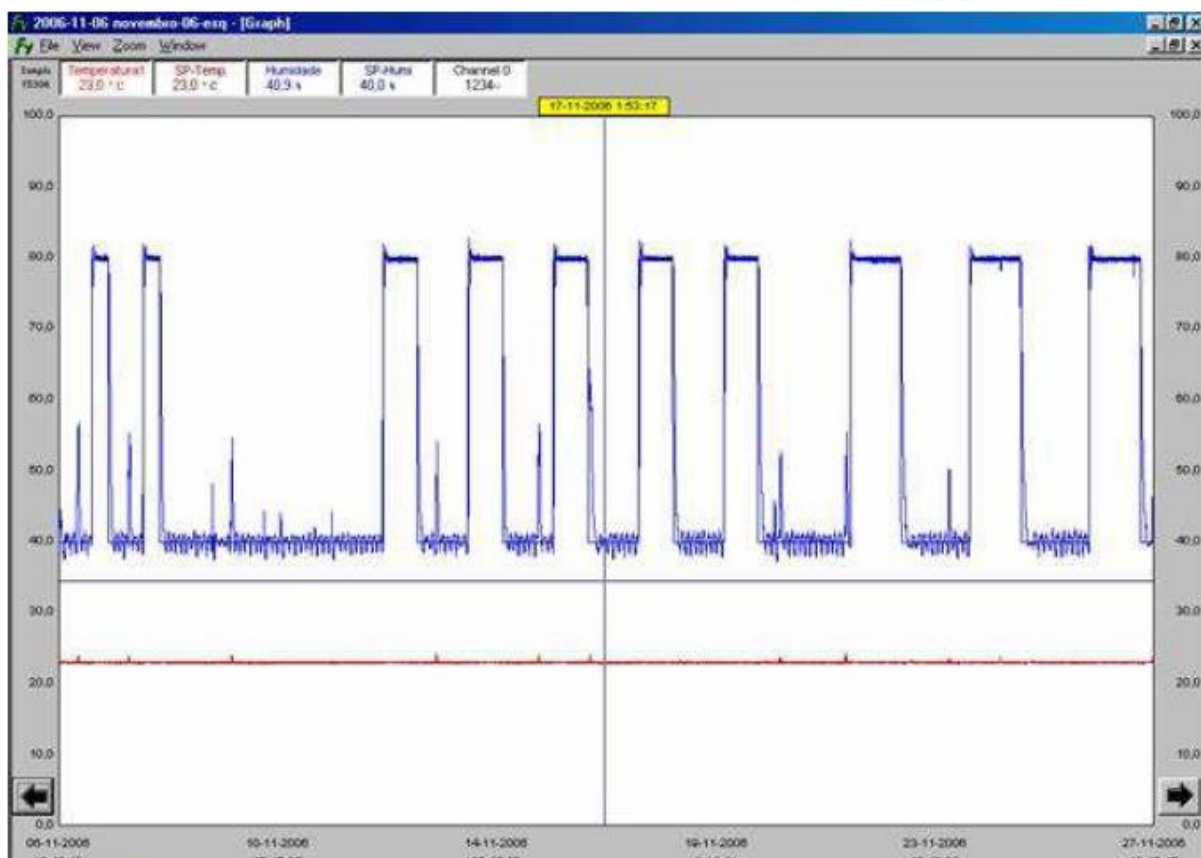


Fig.32 – Interface do programa Fitoview para observação dos registos realizados nas câmaras climáticas [17]

### 3.2.2. CÂMARA DE FLUXO

Como foi mencionado na secção 3.1, este equipamento foi concebido para o estudo da inércia higroscópica, tratando-se de um modelo à escala reduzida de um compartimento de uma habitação. Para melhor compreensão do mesmo atente-se a figura 19, subsecção 2.4.2., onde está representada e legendada a câmara de fluxo.

Devido às dimensões da câmara climática envolvente e da dimensão da porta da mesma, a câmara de fluxo estava limitada em termos de tamanho, por isso a sua materialização consistiu numa caixa de forma paralelepípedica, com 150 cm de comprimento, 52,4 cm de largura e uma altura de 58,4 cm, toda ela construída em acrílico. Na figura 33 observa-se a câmara de fluxo no interior da câmara climática 1.

A área destinada à colocação dos provetes a ensaiar está restringida à base desta câmara, sendo os mesmos inseridos pela abertura que se encontra numa das faces laterais a esse nível.

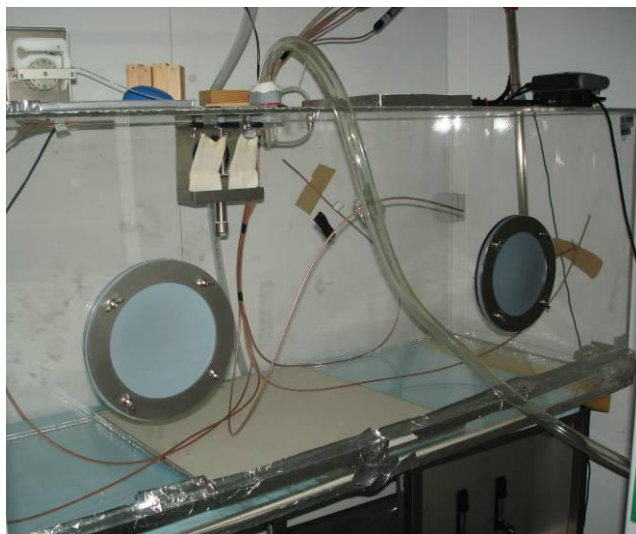


Fig.33 – Câmara de fluxo

De forma a garantir o fácil manuseamento do equipamento que se encontra no seu interior e se poder introduzir os provetes de ensaio esta câmara possui um total de três aberturas, como se pode verificar na figura 34. A concepção destas teve como uma das principais preocupações a estanquidade ao ar, garantida pelas membranas de borracha que as delimitam, sendo que a abertura para inserção dos provetes é selada, com fita de alumínio, após introdução dos mesmos.



Fig.34 – Pormenores das aberturas da câmara de fluxo

Para além de todas estas características físicas, esta câmara possui ainda vários equipamentos incorporados essenciais ao estudo da inércia higroscópica, desta forma, destaca-se:

- Sistema próprio de produção de vapor;
- Sistema de ventilação;
- Sistema de monitorização.

À excepção do sistema próprio de produção de vapor, que se revelou dispensável visto o modelo idealizado para o ensaio prever a ligação da câmara climática 2 à câmara de fluxo que suprime estas necessidades, os restantes sistemas vão ser descritos mais detalhadamente nas seguintes subsecções.

### 3.2.2.1. Sistema de ventilação

O sistema de ventilação encontra-se numa posição exterior á câmara de fluxo, e elaborando uma descrição no sentido de aspiração do ar, pode-se referir o seguinte:

- O ar é aspirado em dois pontos extremos e opostos da câmara de fluxo, através de dois tubos em aço, de 2 cm de diâmetro;
- Estes convergem e ligam-se através de uma ligação em “T” a uma mangueira de PVC transparente que se liga á bomba de extracção;
- Por seu turno, a bomba é ligada a dois rotâmetros, de gamas de caudais variáveis, onde o ar é extraído para a ambiência da câmara envolvente.

Na figura 35, estão ilustrados alguns dos pormenores da instalação que foram descritos.



a)



b)



c)



d)

Fig.35 – Pormenores do sistema de ventilação, a) Tubos de aspiração de ar, b) Ligação em “T”, c) Bomba de extracção de ar e d) Rotâmetros

Em termos de admissão de ar, o processo original previa um orifício na face superior da câmara, com 3,5cm de diâmetro, possibilitando desta forma trocas de ar entre esta câmara e a câmara envolvente.



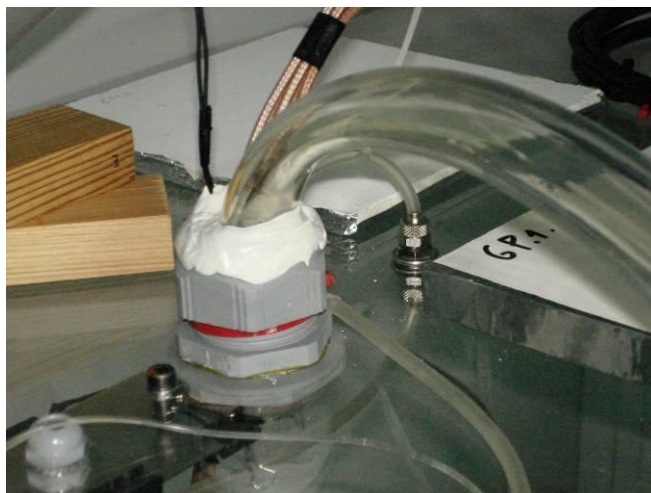


Fig.36 – Pormenor do orifício de admissão de ar

Como foi referido no início deste capítulo, é neste local que se pode introduzir a mangueira que está ligada à câmara climática 2, figura 36.

Desta forma, todo o sistema é controlado pelos dois rotâmetros, que estão ligados à bomba de extracção, sendo que cada um destes possui um flutuador de esfera indicador do caudal extraído. Assim como possuem precisões diferentes, estando um deles habilitado para extrair gamas de caudais entre 2 l/min a 30 l/min e o outro 10 l/min a 100 l/min.

Posto isto, e no total podem ser extraídos caudais entre 2 l/min e os 130 l/min, que face ao volume da câmara correspondem respectivamente, a  $0,26h^{-1}$  e  $17h^{-1}$  renovações horárias.

#### 3.2.2.2. Sistema de monitorização

Da mesma forma como foi descrito o sistema de ventilação, pode-se dizer que este sistema é composto por:

- Cinco sondas de temperatura e humidade relativa modelo HygroClip SC04, figura 37 (a), com precisões de  $\pm 1,5\%$  de HR e  $\pm 0,3^{\circ}C$ ;
- Um registador de dados modelo HygroLog NT, ao qual estão ligadas todas as sondas, figura 37 (b), e que tem acoplado uma outra sonda.

Por sua vez o registador de dados, tem a possibilidade de se ligar a um computador, e através da interface do programa HW4, pode-se verificar, em tempo real, todas as variações registadas. Através do programa mencionado é possível programar o registo, sendo que para todos os ensaios foi estabelecido o intervalo de cinco minutos, assim como armazenar todos os dados recolhidos para folhas de cálculo automático do tipo Excel.



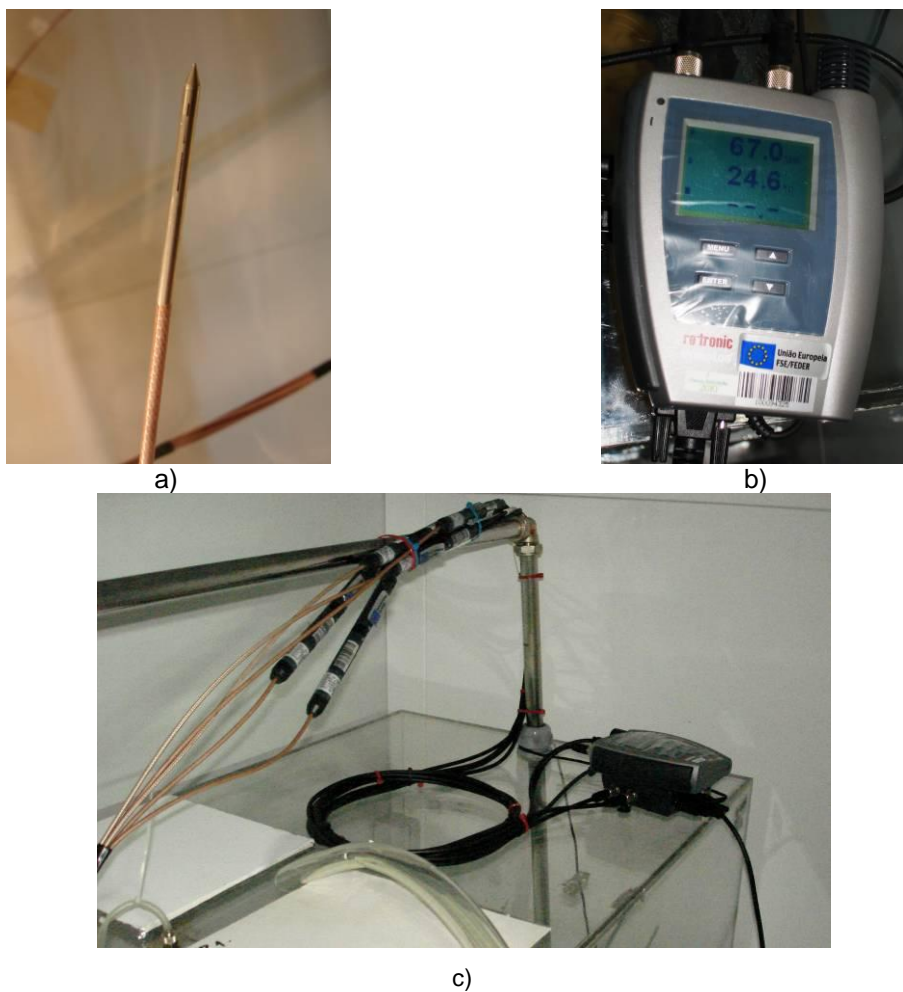


Fig.37 – Equipamentos constituintes do sistema de monitorização, a) Sonda, b) Registador de dados e c) Ligação das sondas ao registador de dados

Deve ser ainda salientado que as sondas foram dispostas em cada uma das faces interiores da câmara à excepção da base da mesma, que está reservada à recepção dos provetes a ensaiar, na figura 38, está exemplificada, esquematicamente, a posição de cada uma das sondas.

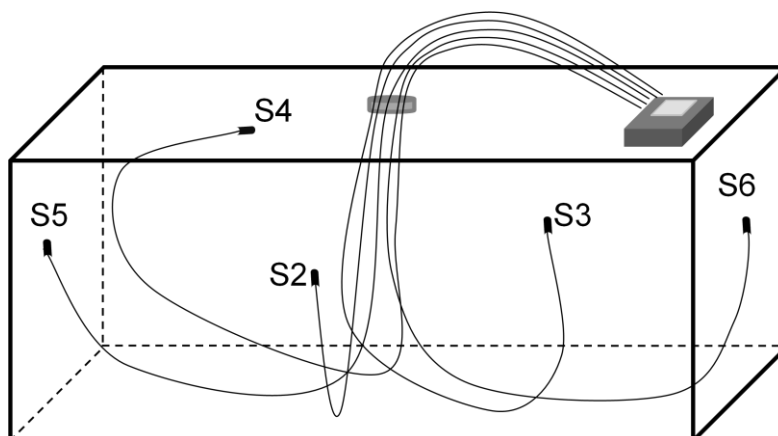


Fig.38 – Esquema ilustrativo da disposição das sondas no Interior da câmara de fluxo

### 3.2.3. MODELO LABORATORIAL REPRESENTATIVO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES

A maior novidade implementada no modelo de ensaio definido para a realização deste estudo, consistiu na forma como foi prevista a reprodução do clima exterior.

Desta forma, a câmara climática 2, assumiu o papel exclusivo de reproduzir a temperatura e humidade relativa representativas de tal clima.

Como esta câmara não tem qualquer contacto com a câmara de fluxo foi necessário prever uma ligação entre ambas, assim ligaram-se estes dois equipamentos por meio de uma mangueira em PVC transparente, com comprimento total de 6m.

Descrevendo o seu trajecto, como está apresentada no esquema da figura 29, secção 3.2., uma das extremidades da mangueira foi fixada a meia altura da câmara climática 2, de seguida segue para o exterior da mesma através de um orifício, posteriormente entra na câmara 1 por um orifício semelhante, e por fim, a outra extremidade é introduzida na câmara de fluxo no orifício de admissão de ar.

Na figura 39, encontra-se ilustrado parte da ligação câmara de fluxo câmara climática 2, efectuada pela mangueira.



Fig.39 - Ligação da câmara climática 2 à câmara de fluxo, pormenor da mangueira

Na análise do clima exterior, aproveitou-se os valores médios mensais de temperatura e humidade relativa presentes na base de dados do programa informático de estudo do comportamento higrométrico Condensa 13788, figura 40, para efectuar um pequeno estudo em relação a estes parâmetros, acerca das condições climáticas verificadas em diversas cidades e locais de do país.

A figura 41, mostra a variação da pressão vapor, que como ficou patente na expressão 3, subsecção 2.1.1., é dependente desses dois parâmetros, para os diversos locais analisados e claramente identificados.

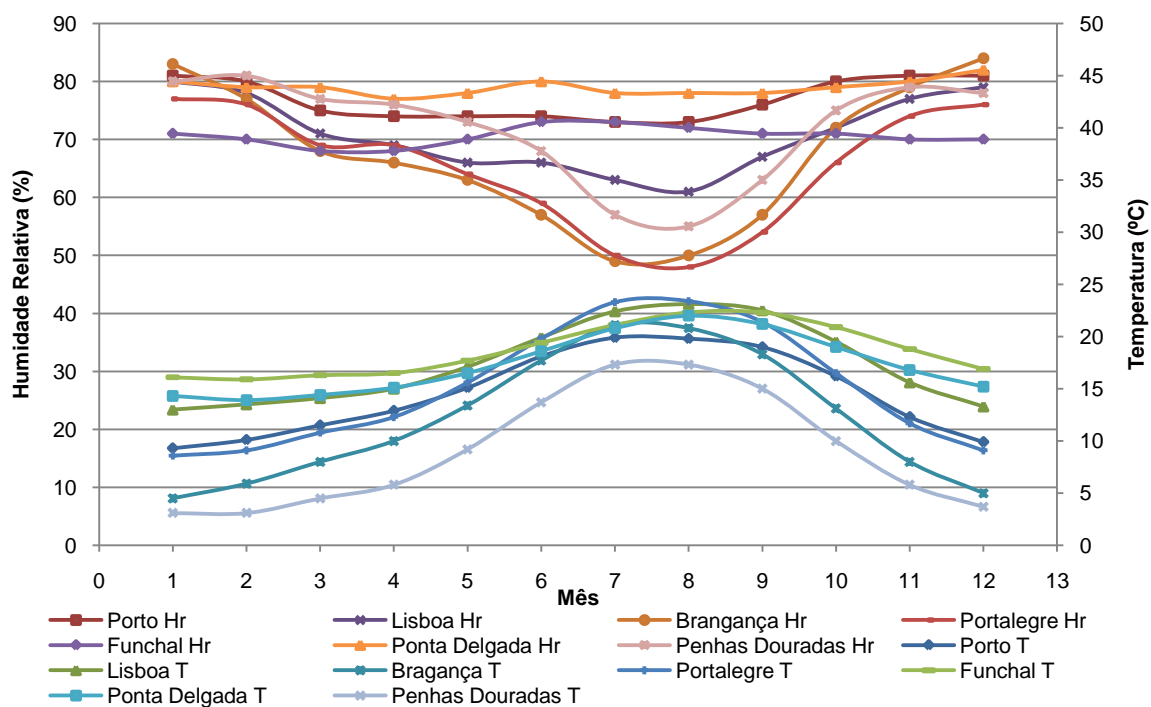


Fig.40 – Variações médias mensais de temperatura e humidade relativa para várias localidades de Portugal

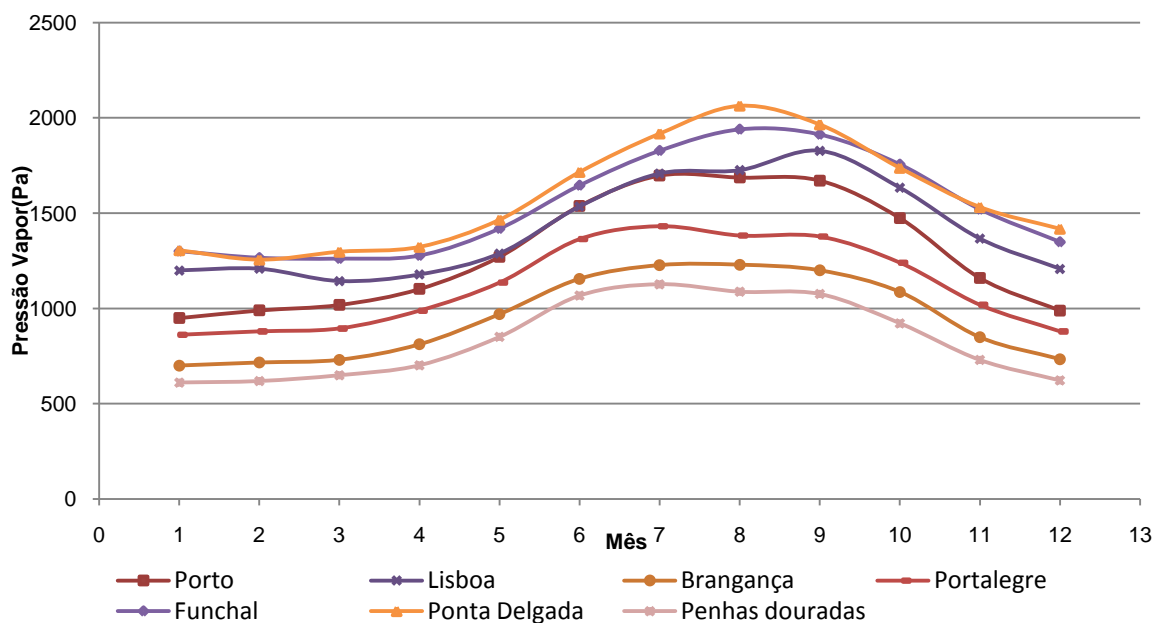


Fig.41 – Variações médias mensais da pressão vapor para várias localidades de Portugal

Estes dados permitem afirmar que, ao longo do ano, as variações de humidade relativa são mais significativas nas regiões interiores verificando-se um decréscimo da percentagem da mesma nos meses mais quentes, por sua vez as localidades costeiras apresentam reduzidas variações, em relação ao valor médio deste parâmetro, ao longo do ano.

Já no que diz respeito à temperatura, a diferença entre as localidades costeiras e interiores apresenta um comportamento semelhante, com temperaturas mais baixas no Inverno e temperaturas mais elevadas no Verão, nas ilhas este comportamento não se torna tão evidente, pois a temperatura média mensal oscila pouco durante o ano. Em relação aos outros locais verifica-se que é no interior que as amplitudes térmicas anuais são maiores.

Relativamente à pressão vapor, e visto este parâmetro ser dependente dos outros dois mencionados, verifica-se que as maiores variações ocorrem nas localidades costeiras, destacando-se um aumento, à medida que a temperatura média mensal vai aumentando e um decréscimo, à medida que a esta diminui.

No quadro 7, são apresentados os valores médio mensal máximo e mínimo relativos à pressão vapor, assim como a diferença entre esses dois valores. Deste modo, e pelo observado, confirma-se a predominância de pressões vapor mais elevadas nas zonas litorais e ilhas e menores no interior. Também se verifica que a variação de pressões ao longo do ano apresenta maiores amplitudes nas localidades mais próximas do mar.

Quadro 7 – Valores médio mensal máximo e mínimo relativos à pressão vapor, amplitude máxima anual

Localidade	Pressão vapor máx. (Pa)	Pressão vapor mín. (Pa)	$\Delta$ PV (Pa)
Porto	1698	950	748
Lisboa	1828	1199	628
Bragança	1229	699	530
Portalegre	1431	861	571
Funchal	1940	1300	640
Ponta Delgada	2064	1256	808
Penhas Douradas	1087	611	476

Com os dados que foram analisados até ao momento, dá para aferir algumas conclusões interessantes como se verificou, mas uma análise da variação de pressão vapor diária ao longo do ano permite aportar a esse estudo mais alguns dados importantes.

Desta forma atente-se à figura 42, onde é apresentada a variação de pressão vapor diária observada ao longo de um ano nas cidades de Porto e Lisboa, os valores foram obtidos pela consulta da base de dados no METEONORM.

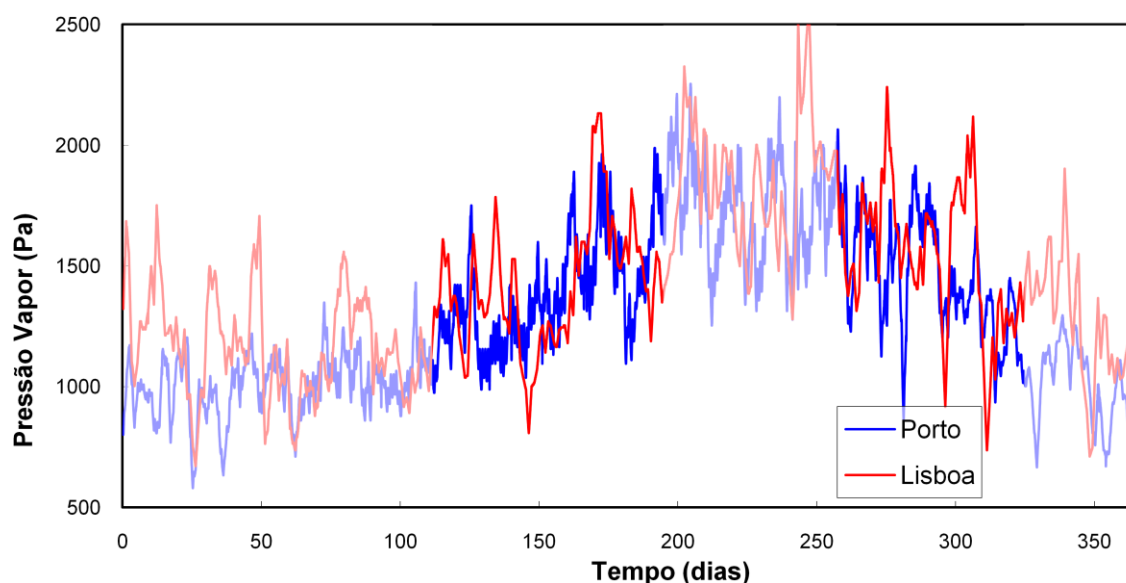


Fig.42 - Variações médias mensais da pressão vapor para Porto e Lisboa

Pela observação do mesmo verificam-se dois períodos, onde a variação da pressão vapor se torna mais evidente, estes intervalos correspondem à transição da estação fria para a estação quente e vice-versa. Assim, o primeiro período de tempo referido corresponde a parte do mês de Abril, e aos meses completos de Maio e Junho, enquanto o segundo corresponde aos meses de Outubro e Novembro. Será a estes dois intervalos que vai ser dada uma maior atenção ao longo deste trabalho, analisando, desta forma, a influência da inércia higroscópios sazonal.

Face ao observado, e visto ser necessário reproduzir as condições de pressão vapor exterior, optou-se por delimitar um intervalo compreendido entre os 1400 Pa e os 2200 Pa, sendo desta forma os valores limite para os ensaios a realizar.

### 3.3. TESTES INICIAIS À INFRA-ESTRUTURA DE ENSAIO

#### 3.3.1. CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS

Numa primeira fase do estudo experimental, os ensaios executados visaram essencialmente o teste de algumas combinações dos parâmetros definidores da infra-estrutura assim como analisar o comportamento da mesma.

Desta forma, foi avaliado o sistema de monitorização, a higroscopicidade da câmara de fluxo, a inércia térmica da mesma e ainda o sistema de ligação da câmara climática 2 à câmara de fluxo.

#### 3.3.2. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Este primeiro ensaio consistiu em proceder a variações de temperatura e humidade relativa na câmara climática 1 e verificar os valores que eram monitorizados pelo sistema de sondas.

Para uma maior facilidade de leitura, adaptou-se uma numeração para os registos obtidos. S1 designa a sonda de temperatura e humidade relativa incorporada no registor de dados, S2 a S6 corresponde às

sondas HygroClip já descritas em 3.2.2.2, e CC1 e CC2 o registo da câmara climática 1 e 2, respectivamente.

Na figura 43 estão rerepresentadas as variações de temperatura registadas pelos sistemas de monitorização implementados para um período de 28h. Enquanto na figura 44 se encontram os registos, para o mesmo período, consequentes da variação da humidade relativa.

No quadro 8 estão representados os “set points” executados ao longo deste ensaio.

Quadro 8 - “Set points” do ensaio de monitorização

Set point	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
1	23	50
2	15	50
3	15	70
4	23	70

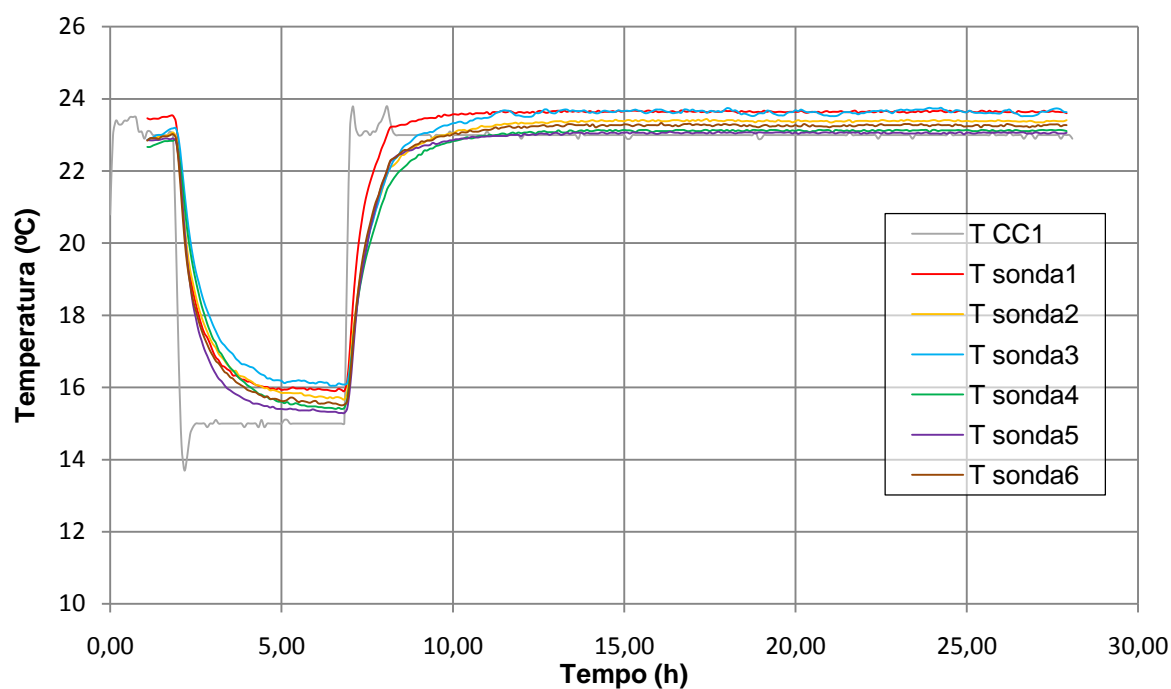


Fig.43 – Variação da temperatura registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática

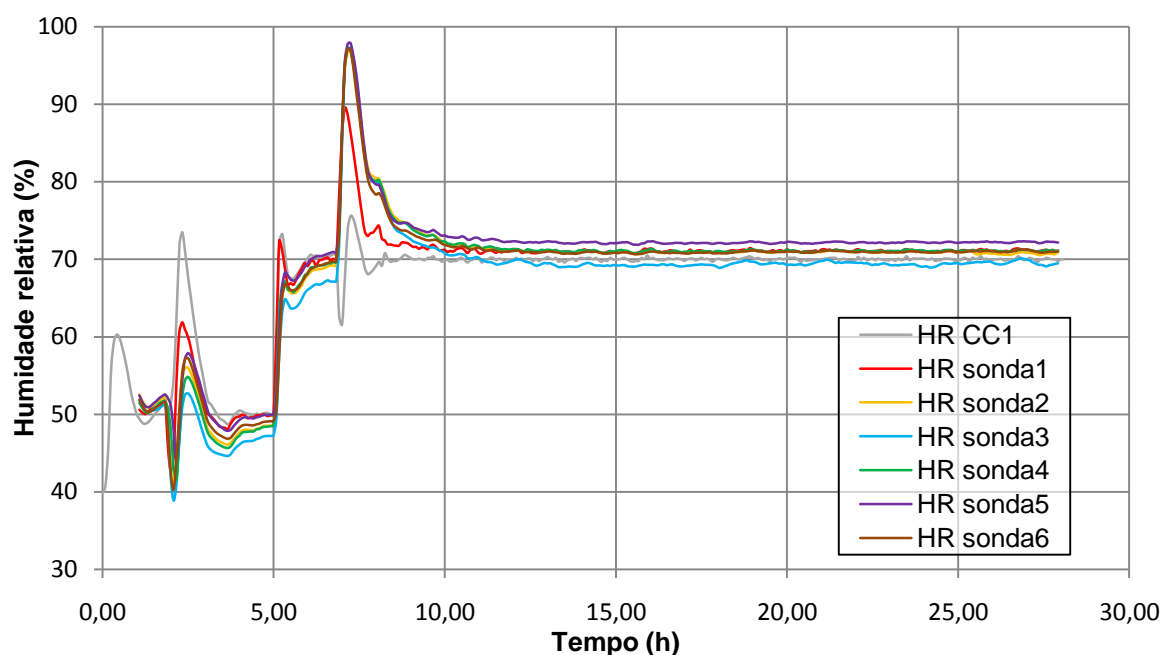


Fig.44 – Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática

A observação destes gráficos permite desde logo detectar ligeiros desvios em termos de registo, entre a câmara climática, CC1, e a sonda S1 e o grupo de sondas S2 a S6. No quadro 9 estão representados os valores médios para cada um destes “set points” nos períodos de estabilização, considerando para tal o registo de CC1, da sonda 1 e a média dos registos das sondas S2 a S6,  $\overline{S2 : S6}$ .

A análise é efectuada tendo em atenção a diferença máxima entre valores de cada sonda,  $dm_{S2 : S6}$  e a diferença entre os registos do sistema de monitorização e os registos da câmara climática,  $\overline{S2 : S6} - CC1$  e  $S1 - CC1$ .

Quadro 9 – Estudo comparativo do sistema de monitorização

Períodos estacionários	CC1	S1	$\overline{S2 : S6}$	$dm_{S2 : S6}$	$\overline{S2 : S6} - CC1$	$S1 - CC1$
50% HR	50,05	49,89	48,55	1,55	-1,50	-0,16
70% HR	69,68	71,06	70,92	0,55	0,68	1,38
15°C	15,01	15,94	15,68	0,20	0,67	0,93
23°C	23,00	23,63	23,28	0,15	0,28	0,63

A partir dos valores médios aqui observados é possível referir o seguinte:

- A diferença máxima, de %HR, registada entre os valores médios das sondas S2 a S6 e a sua média, situou-se próxima dos 1,5%, este facto poderá estar associado à menor estabilidade da câmara climática para % de HR mais baixas;
- A diferença máxima, de temperatura, registada entre os valores médios das sondas S2 a S6 e a sua média, situou-se nos 0,20°C;

- Registou-se uma diferença máxima, entre os valores médios das sondas S2 a S6 e da câmara climática, inferior a 1,5% HR, sendo que as diferenças registadas se encontram muito próximas dos desvios médios da média das sondas S2 a S6, logo podendo considerar-se aceitável;
- Em termos de temperatura esta diferença situou-se nos 0,67°C, e também aqui as diferenças verificadas se encontram próximas do desvio médio da média das medições das sondas S2 a S6, principalmente para o período de maior estabilização correspondente a 23°C;
- A diferença máxima entre os valores médios registados pelas sondas S1 e a câmara climática CC1 rondou os 1,40% HR, um pouco elevada visto ser representativo do maior período de estabilização;
- No que diz respeito à mesma diferença mas relativamente à temperatura, esta situou-se próxima de 1°C e nunca inferior a 0,5°C, o que denota também uma diferença de medição considerável, por isso os registos facultados por esta sonda serão desprezados;

A medição de mais de 0,5 °C por parte da sonda 1 pode estar associada a esta estar acoplada ao registador de dados que se encontra no exterior da câmara de fluxo, registando essa diferença devido ao aquecimento deste equipamento quando ligado.

### 3.3.3. HIGROSCOPICIDADE DA CÂMARA DE FLUXO

Como a câmara de fluxo foi desenvolvida para o estudo da inércia higroscópica, esta deveria ser um equipamento desprovido de higroscopicidade, para que os resultados aí obtidos aquando dos ensaios dos provetes, em relação a este parâmetro, fossem apenas e só dependentes dos mesmos.

Por isso, para verificar a possível influência da infra-estrutura nos ensaios de averiguação da inércia higroscópica dos materiais de revestimento, procedeu-se a execução do ensaio IH1, que consistiu em testar a transição entre dois valores de equilíbrio da humidade relativa. O quadro 10 apresenta as características deste ensaio.

Quadro 10 – Características do ensaio do estudo da higroscopicidade da câmara de fluxo

Ensaio	Tempo (h)	Câmara Climática		Câmara de fluxo
		T (°C)	HR(%)	N (h <sup>-1</sup> )
IH3	0 – 3	23	50	>10
	3 – 4,75	23	50	0
	4,75 – 24,58	23	70	0,3
	24,58 – 27,08	23	70	>10
	27,08 – 31,08	23	70	0
	31,08 – 74,58	23	50	0,45

A figura 45, mostra graficamente a variação da pressão vapor registada pelos vários equipamentos de monitorização, assim como as curvas teóricas relativas a renovações horárias de 0,3 h<sup>-1</sup> e 0,45 h<sup>-1</sup>. Estas curvas foram obtidas pela aplicação da expressão 8.



$$p_{v,i} = p_{v,i,\infty} + (p_{v,i,0} - p_{v,i,\infty}) \cdot e^{-N \cdot t} \quad (8)$$

Nesta expressão,  $p_{v,i,\infty}$  corresponde à pressão de vapor interior determinada para o regime constante (Pa),  $p_{v,i,0}$  corresponde ao valor inicial dessa pressão (Pa),  $N$ , corresponde a taxa de renovação horária de ar ( $\text{h}^{-1}$ ), e  $t$ , corresponde ao tempo (h) .

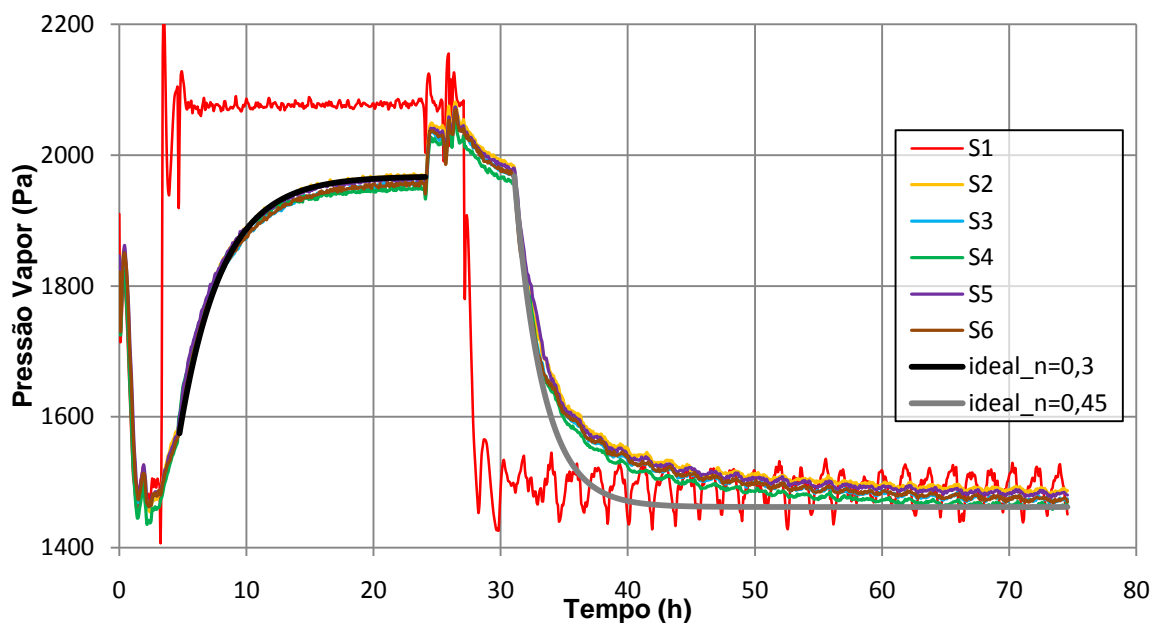


Fig.45 – Variação da pressão vapor do ensaio IH3

A comparação entre os dados registados e as curvas teóricas respectivas às renovações horárias referidas demonstra diferenças não muito grandes, para a transição de 50% para 70% de humidade relativa com o número de renovação horária igual a  $0,3 \text{ h}^{-1}$  o comportamento se aproximou do ideal o mesmo não foi tão evidente na transição de 70% para 50% de humidade relativa com  $0,4$  renovações horárias, onde se observa um ligeiro desfasamento entre a curva ideal e o que realmente se observou.

Assim se para a primeira transição analisada poderíamos afirmar convictamente que a câmara de fluxo não apresentava grande higroscopicidade, na segunda não há tantas certezas, isto pode ter origem no facto da precisão dos rotâmetros para caudais muito pequenos ser diminuta e desta forma não ser possível definir com a precisão desejada a taxa de renovação horária de ar pretendida.

Apesar disso e como todos os ensaios vão decorrer em condições semelhantes, a possível influência da higroscopicidade da câmara de fluxo nos resultados obtidos é reduzida.

#### 3.3.4. INÉRCIA TÉRMICA DA CÂMARA DE FLUXO

Apesar dos ensaios de análise da inércia higroscópica serem executados em regime isotérmico, com uma temperatura igual a  $23^\circ\text{C}$ , decidiu-se fazer um estudo da inércia térmica da câmara de fluxo e verificar a sua influência nos resultados obtidos.

Dessa forma procedeu-se ao ensaio IT1, descrito no quadro 11, que foi elaborado a humidade relativa constante, 50% e temperatura variável. Para tal procedeu-se à programação da câmara climática 1 definindo a solicitação desejada como está descrita no quadro mencionado. Todo o processo foi executado com a câmara de fluxo fechada.

Quadro 11 – Características do ensaio do estudo da inércia térmica da câmara de fluxo

Ensaio	Tempo (h)	Câmara Climática		Câmara de fluxo N (h <sup>-1</sup> )
		T (°C)	HR(%)	
IT1	3,2	23	50	0
	24,2	15	50	0
	22,8	23	50	0
	21,3	15	50	0

Desta forma, os dados registados pelo sistema de monitorização estão apresentados na figura 46.

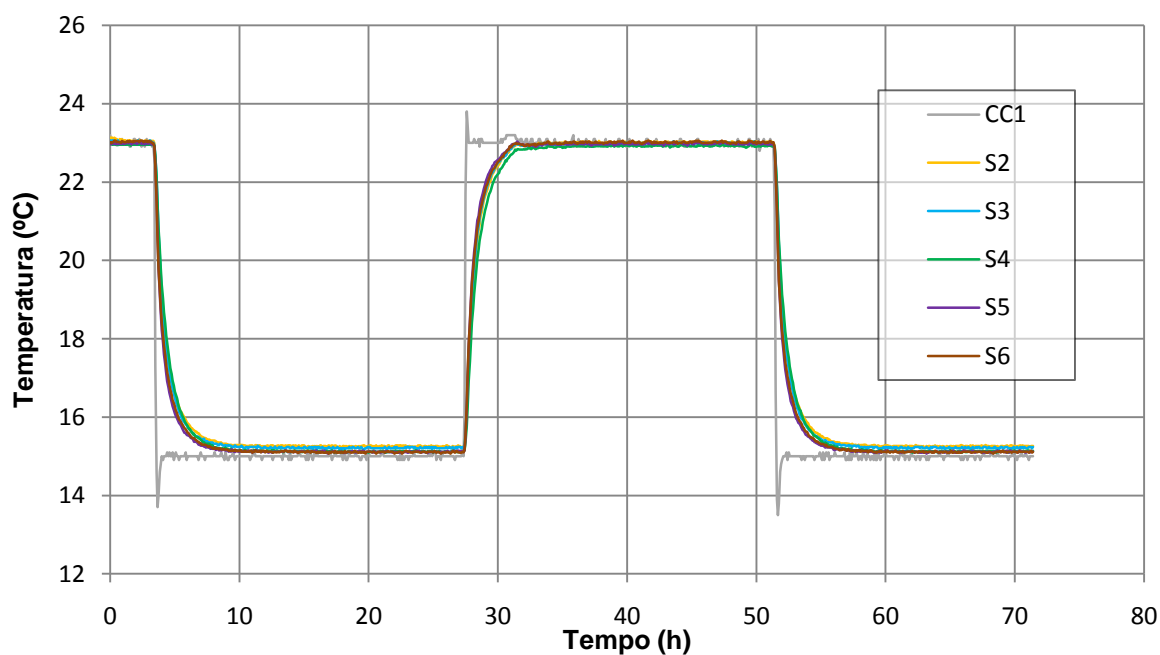


Fig.46 – Variação da temperatura, para estudo da inércia térmica da câmara de fluxo

Analisando a figura verifica-se que a inércia térmica da câmara de fluxo, é mínima ou mesmo desprezável, visto as variações de temperatura registadas no interior da mesma acompanharem o comportamento definido pela solicitação imposta.

### 3.4. ENSAIOS INDICADORES DE INÉRCIA HIGROSCÓPICA

#### 3.4.1. MODELO DE ENSAIO

Uma vez testado todo o equipamento a ser usado neste estudo experimental, e verificadas todas as suas potencialidades é chegado o momento de analisar a influência da inércia higroscópica dos materiais de revestimento interior.

Assim, e visto o objectivo principal da dissertação se centrar na análise da inércia higroscópica sazonal foi definido um programa modelo de ensaio que consistiu nos seguintes pressupostos:

- Manter a câmara climática 1 num nível estacionário de humidade relativa e temperatura, deste modo definiu-se um valor 50% para a humidade relativa e temperatura de 23°C;
- Abrir os orifícios da câmara de fluxo, permitindo a entrada do ar que se encontra na câmara climática 1, definindo desta forma as condições iniciais de ensaio;
- Programar a câmara climática 2, de forma a definir as condições do ar que representará as condições climáticas exteriores, figura 47.
- Fechar a câmara de fluxo e proceder a ligação desta à câmara climática 2, através da mangueira;
- Definir o caudal de ventilação.

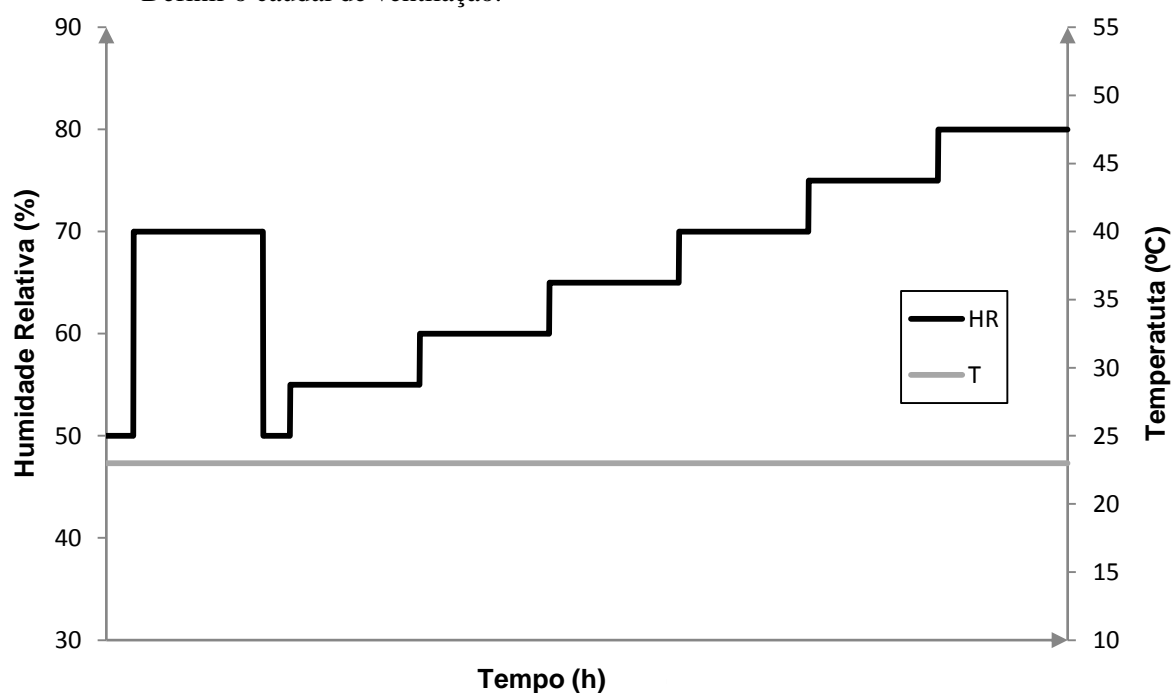


Fig.47 – Programa definido na câmara climática 2, para realização de ensaio sobre inércia higroscópica sazonal

Este ensaio pode ser dividido em duas partes, a primeira parte do ensaio servirá para testar o caudal de ventilação e corresponde ao primeiro patamar imposto, sendo definida por uma transição entre 50% e 70% de humidade relativa.

A segunda parte do ensaio só começa quando a câmara de fluxo e a câmara climática 2 estiverem estabilizadas com as condições iniciais, temperatura de 23°C e humidade relativa de 50%.

Após estarem garantidas estas condições, dá-se início à segunda fase do ensaio, que consiste em fazer variar a humidade relativa da câmara climática 2 em patamares sucessivos, com aumentos de 5% de

humidade relativa. Esses patamares terão uma duração de 24 horas, e permitem fazer variar a humidade relativa dos 50% aos 80%.

Por fim, e face à possibilidade de se poder colocar provetes de materiais de revestimento no interior da câmara de fluxo, e ser possível também definir caudais de ventilação da mesma, proceder-se-á à simulação de várias configurações de ensaio.

### 3.4.2. CICLO SAZONAL $N = 0,17 \text{ h}^{-1}$

#### 3.4.2.1. Câmara de fluxo vazia

Face a que, numa primeira fase a bomba necessária à ventilação da câmara de fluxo se encontrava avariada, decidiu-se proceder ao ensaio, sem impor à estrutura laboratorial nenhum caudal de ventilação, mas aproveitando um caudal constante detectado.

Deste modo resolveu-se proceder ao ensaio. Tratando-se o primeiro ensaio utilizando o modelo representado na figura 48, a câmara de fluxo encontrava-se vazia, e visto esta ser um equipamento com inércia higroscópica muito baixa, como ficou demonstrado na subsecção 3.3.3., os seus resultados serão os ideais para se obter termos de comparação com os ensaios posteriores.

Assim, na figura 48, estão representados os resultados obtidos, em termos de pressão vapor, para esta primeira configuração.

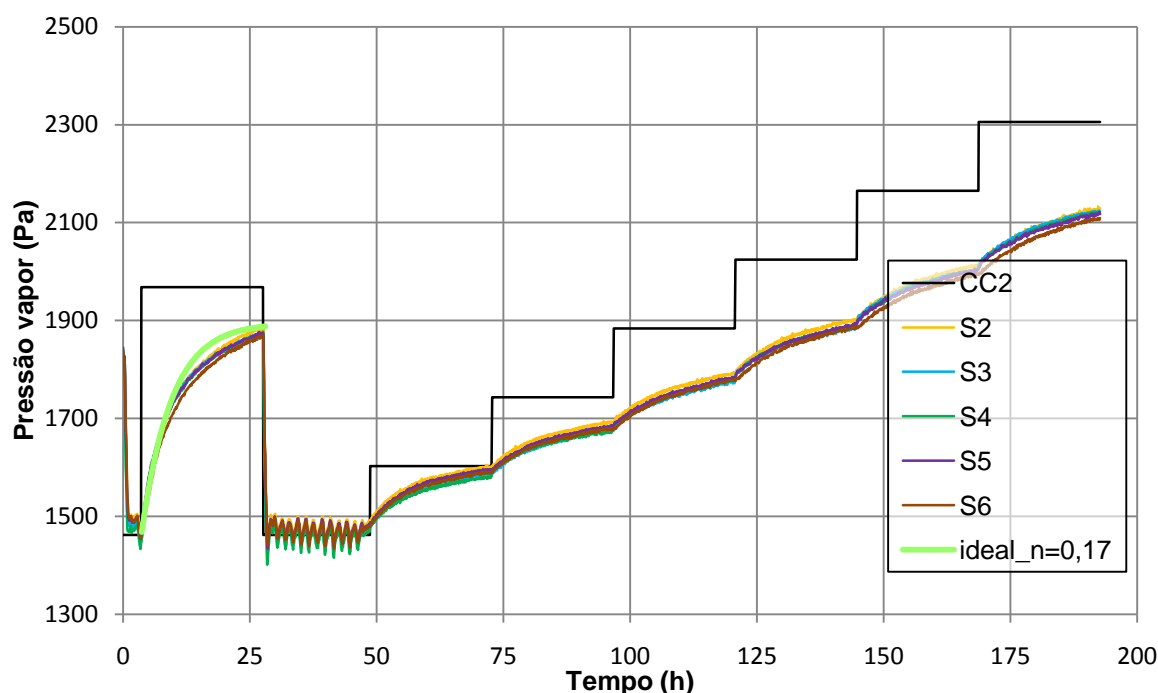


Fig.48 – Ensaio IH4, Câmara de fluxo vazia e  $N=0,17 \text{ h}^{-1}$

Com os resultados obtidos, foi possível determinar o caudal de ventilação a que este ensaio decorreu, dessa forma o valor obtido para este parâmetro foi  $1,36 \text{ l/min}$ , que corresponde a um  $N = 0,17 \text{ h}^{-1}$ , como fica comprovado com a curva teórica obtida com base na expressão 8, e que se encontra traçada na figura 48.

Devido a cortes eléctricos verificados no LFC, não foi possível o registo das variações dos parâmetros humidade relativa e temperatura das duas câmara climáticas por isso e visto estes valores serem praticamente coincidentes com os programados, sempre que não foi possível registar estes dados, optou-se por representar os valores programados.

No que diz respeito à segunda parte do ensaio, e que compreende o aumento ciclo de humidade em 5% a cada 24 horas, pode retirar-se algumas conclusões:

- A sonda S6 nos dois últimos patamares, correspondentes a 75% de HR e 80 HR, apresenta um ligeiro desvio em relação aos valores registados pelas restantes sondas, deste modo, os seus registos foram descartados nas análises comparativas;
- Verifica-se ainda que os registos de todas as sondas apresentam valores de pressão vapor inferiores ao programado (CC2), isto poderá dever-se a ser utilizado um caudal de ventilação muito reduzido, não permitindo a estabilização completa da câmara de fluxo em cada patamar de humidade relativa.

Esta última conclusão aferida do gráfico apresentado, apesar de evidente, torna-se um pouco desprezável, no que diz respeito aos ensaios a executar, pois estes serão realizados nas mesmas condições de ventilação e por isso as possíveis diferenças registadas em termos de pressão vapor não serão devidas a isso.

#### 3.4.2.2. Câmara de fluxo com três provetes de gesso cartonado no seu interior

O segundo ensaio, relativo à taxa de renovação horária da câmara de fluxo de 0,17, teve como principal objectivo verificar o efeito da inércia higroscópica, devido à inserção na mesma de três provetes de gesso que no total perfizeram a área de 0,75 m<sup>2</sup>.

Visto o principal objectivo ser averiguar o efeito da inércia higroscópica, a primeira fase do ensaio programado não foi executada. Os resultados obtidos foram comparados com os do ensaio IH4, dessa forma está representado no gráfico da figura 49, os valores médios registados entre as sondas S2:S5 em cada um dos ensaios.

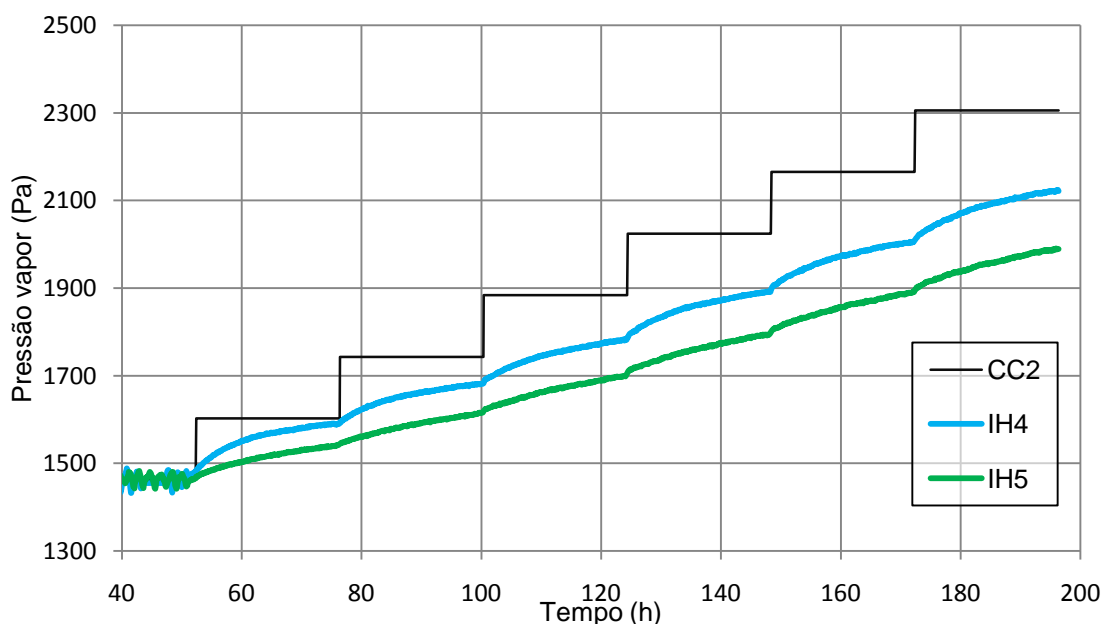


Fig.49 – Ensaio IH5, câmara de fluxo com 0,75 m<sup>2</sup> de GC e N = 0,17 h<sup>-1</sup>, comparação com ensaio IH4

Observando a figura, verifica-se facilmente que no ensaio IH5, registou um decréscimo dos valores de pressão vapor face ao ensaio IH4, e consequente os valores obtidos foram também inferiores aos espectáveis pelo modelo de ensaio programado representado por CC2.

Face ao resultado obtido é possível atribuir a diferença registada, entre os ensaios, ao efeito da inércia higroscópica do gesso cartonado, verificando-se ainda que o efeito da mesma aumenta com o aumento da humidade relativa, pois observa-se um maior afastamento entre as curvas consequência disso mesmo.

### 3.4.2.3. Câmara de fluxo com um provete de gesso cartonado no seu interior

Para fechar o ciclo de ensaios relativos à ventilação sem extracção de ar com bomba, foi realizado um ensaio nas mesmas condições que os anteriores, apenas alterando a área de provetes instalada no interior da câmara de fluxo.

Assim, foi introduzido nesta um único provete de gesso cartonado com área correspondente a  $0,25\text{m}^2$  e registaram se os valores de humidade relativa e temperatura verificados, e através da expressão 2 traçou-se a curva correspondente de pressão vapor.

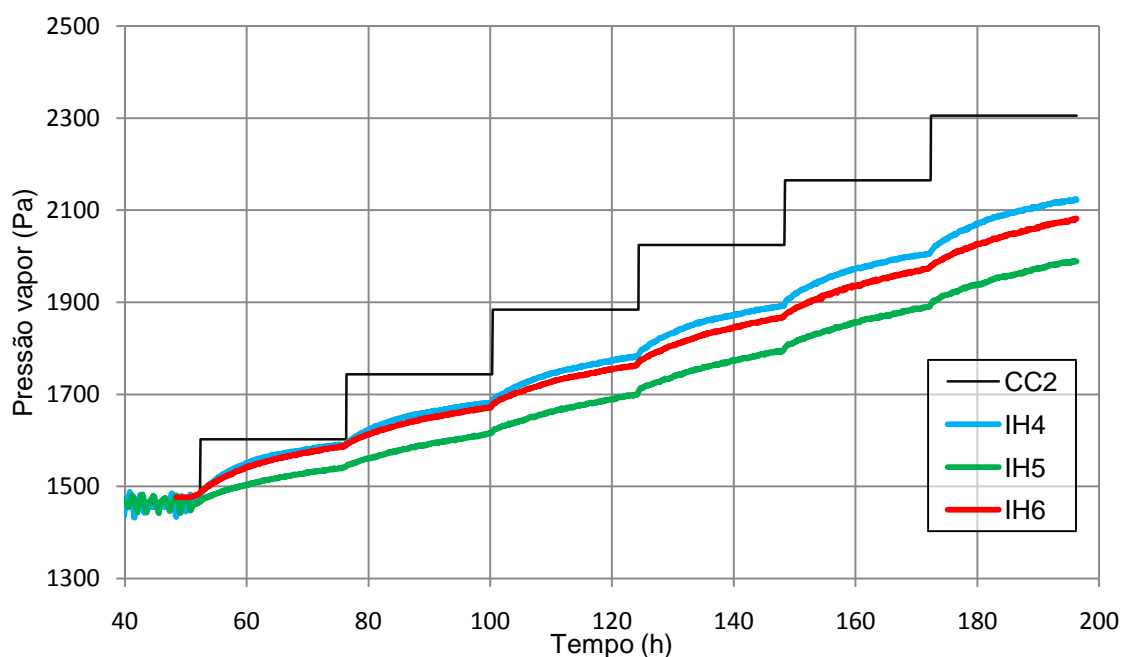


Fig.50 – Ensaio IH6, câmara de fluxo com  $0,25\text{ m}^2$  de GC e  $N = 0,17\text{ h}^{-1}$ , comparação com ensaio IH4 e IH5

Uma vez mais resolveu proceder-se a visualização dos resultados obtidos neste ensaio comparando os com os ensaios já realizados, para dessa forma conseguir aferir um maior número de conclusões.

Pela observação do gráfico apresentado, e no que diz respeito ao novo ensaio apresentado, verifica-se novamente, apesar de menos pronunciado o efeito da inércia higroscópica do gesso cartonado, mas desta vez as evidências só são confirmadas a partir do terceiro patamar.

Uma outra conclusão que se pode retirar do apresentado é que quanto maior for a área de material introduzida maior é o efeito da inércia higroscópica, como se comprava com a posição da curva IH6 que se encontra sempre acima da curva do ensaio IH5.

Mais uma vez se verifica que o efeito da inércia higroscópica aumenta com o aumento da humidade relativa.

#### 3.4.2.4. Comparação dos valores registados em cada um dos ensaios

Finda que está a comparação gráfica dos ensaios, e retiradas que foram as conclusões observáveis através dos mesmos é chegado o momento de realizar uma comparação numérica entre os vários valores registados pelas sondas.

Na realização da análise aproveitou-se o facto de as diferenças máximas em cada patamar se observarem aquando do término de cada um deste para estabelecer comparações de resultados. Desta forma é apresentado no quadro 12, os valores registados.

Quadro 12 – Comparação de registos para os ensaios realizados com um  $N=0,17h^{-1}$

Patamar de HR (%)	Pressão Vapor (Pa)			Diferenças de Pressão		
	IH4	IH5	IH6	IH4-IH5	IH4-IH6	IH5-IH6
50	1480	1466	1484	14	-4	-18
55	1591	1542	1588	48	3	-46
60	1683	1615	1674	67	9	-59
65	1782	1703	1768	79	13	-66
70	1891	1798	1869	94	23	-71
75	2007	1891	1977	116	30	-86
80	2122	1989	2082	132	40	-92

Os valores apresentados neste quadro vêm em concordância com o que já foi referido aquando da análise gráfica, deste modo pode dizer-se o seguinte:

- Quanto maior é a área de gesso cartonado no interior da câmara de fluxo maior são as diferenças de pressão registadas, observado pela diferença de pressão vapor entre IH5 e IH6;
- Relativamente às diferenças registadas entre o ensaio IH4 e IH5 verifica-se que as diferenças entre cada um dos patamares anda á volta da dezena e das 2 dezenas de Pa, enquanto entre IH4 e IH5 essa diferença nunca ultrapassa a dezena;
- A diferença entre os ensaios IH5 e IH6 são sempre negativas pois os valores registados por IH5 são sempre superiores aos registados por IH6, esta diferença também é crescente e quase sempre constante, próxima de 6Pa, a excepção é mesmo entre o patamar de 50% e 55% de humidade relativa, onde a diferença de pressão vapor é próximo de 30Pa;
- Dai, e relacionando com o facto de a diferença nesse mesmo intervalo mas entre os ensaios IH4 e IH6, ser menor que zero, poderá dizer-se que uma área reduzida de gesso cartonado contribui pouco em termos de inércia higroscópica;
- Como se verifica que a diferença de pressão vapor entre os ensaios IH4 e IH5 bem como entre IH4 e IH6 são sempre positivos e crescentes à medida que aumenta a humidade

relativa, fica demonstrada a presença e influencia da inércia higroscópica do gesso cartonado nas variações de humidade relativa.

Uma outra comparação que poderá ter algum interesse em ser feita é relativa às médias de pressão vapor no período de ensaio representado. Desse modo são apresentados nos quadros 13 e 14, o estudo comparativo médio da pressão vapor de cada um dos ensaios, relativo a todo o tempo de ensaio e para os últimos três patamares respectivamente.

Quadro 13 – Estudo comparativo médio da pressão vapor de cada um dos ensaios relativo a todo o tempo ensaio

Pressão vapor (Pa)			Diferença de pressão vapor (Pa)			Variação de Humidade relativa (%)		
IH4	IH5	IH6	IH4-IH5	IH4-IH6	IH6-IH5	IH4-IH5	IH4-IH6	IH6-IH5
1864,61	1767,38	1837,33	97,24	27,28	69,96	3,46	0,97	2,49

Quadro 14 – Estudo comparativo médio da pressão vapor de cada um dos ensaios relativo aos últimos três patamares de humidade relativa

Pressão vapor (Pa)			Diferença de pressão vapor (Pa)			Variação de Humidade relativa (%)		
IH4	IH5	IH6	IH4-IH5	IH4-IH6	IH6-IH5	IH4-IH5	IH4-IH6	IH6-IH5
2036,22	1912,58	1996,37	123,64	39,85	83,79	4,40	1,42	2,98

A observação dos quadros comprova tudo aquilo que foi referido aquando da comparação gráfica.

Assim verifica-se que a introdução de três provetes no interior da câmara fluxo, IH5, contribui para um decréscimo médio próximo de 100 Pa comparativamente ao registado com a câmara fluxo vazia, IH4. Se apenas for introduzido um provete, IH6, a diferença média de pressão vapor ronda os 30 Pa. Isto em termos de humidade relativa corresponde a um amortecimento médio de 3,46 % e 0,97 % respectivamente. Logo a introdução de um único provete não traduz uma grande diferença face à não presença de inércia higroscópica.

Como, aquando da observação gráfica se verificou que as maiores diferenças se registavam nos últimos três patamares, decidiu-se comparar em termos médios a pressão vapor dos mesmos, quadro 14. As conclusões são semelhantes às aferidas pelo quadro 13, contudo apresentado um aumento expectável da diferença de pressão vapor e de amortecimento humidade relativa. Assim verifica-se uma diferença próxima de 125 Pa entre o ensaio IH4 e IH5 correspondente a um amortecimento de 4,40 % de humidade relativa (próximo da variação imposta entre cada patamar, 5 %). Já no que concerne à diferença entre o ensaio IH4 e IH6 a diferença de pressão vapor foi de 40 Pa correspondendo a um amortecimento de humidade relativa próxima dos 1,5%.

Face a isto pode afirmar-se que áreas reduzidas de gesso cartonado são responsáveis por amortecimentos pouco consideráveis de humidade relativa, enquanto áreas maiores já apresentam um amortecimento considerável. Apesar disso, não deixa de se verificar, em ambos os casos, um aumento do amortecimento da humidade relativa com o aumento da humidade.



3.4.3. CICLO SAZONAL  $N = 0,3 \text{ h}^{-1}$ 

## 3.4.3.1. Câmara de fluxo vazia

Neste novo ciclo de ensaios, foi possível testar a influência da ventilação mecânica no domínio da inércia higroscópica sazonal, desse modo, definiu-se um caudal de 2,4 l/min, correspondente a uma taxa de renovação horária de 0,3.

Na sequência da linha traçada para os ensaios anteriores, no conjunto de ensaios referentes a este caudal de ventilação, serão analisadas os registos para as configurações correspondentes à câmara de fluxo se encontrar completamente vazia e com três provetes de gesso cartonado.

Assim e começando por analisar a ventilação imposta são apresentados os registos referentes ao ensaio IH7, onde a câmara de fluxo se encontra sem provetes, figura 51.

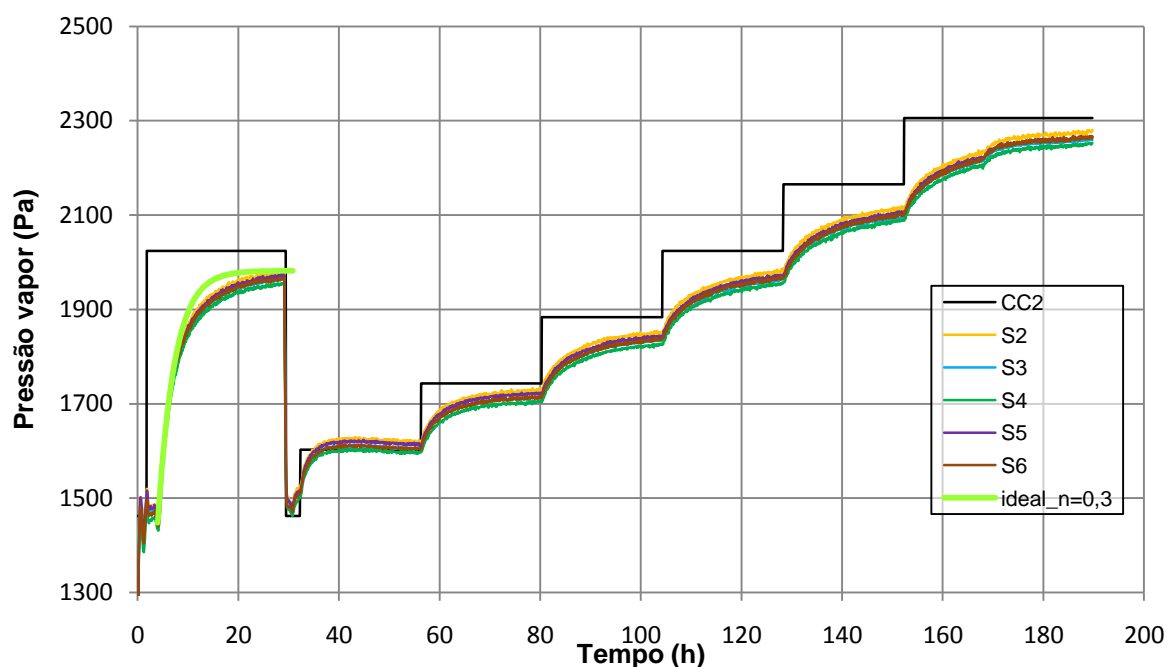


Fig.51 – Ensaio IH7, Câmara de fluxo vazia e  $N = 0,3 \text{ h}^{-1}$

Pela observação da curva teórica correspondente à ventilação pretendida verifica-se que a diferença em relação aos registos efectuados é diminuta, posto isto, a ventilação com a qual decorreu o ensaio foi a pretendida.

O gráfico ilustrado também permite aferir que o tempo destinado a cada patamar de humidade é o adequado, pois verifica-se que os valores registados pelas sondas acompanham as variações impostas pela câmara climática 2.

Visto todas as curvas, referentes às sondas, apresentarem uma grande concordância ao longo do ensaio, na análise comparativa, serão todas consideradas, desta vez.

### 3.4.3.2. Câmara de fluxo com três provetes de gesso cartonado no seu interior

Seguindo a ideologia projectada para este estudo experimental, foi inserido na câmara de fluxo, de novo, os três provetes de gesso cartonado já usados, e registando posteriormente todas as variações verificadas no interior da mesa.

Este ensaio foi realizado, tal como todos os outros, em condições isotérmicas, e com uma ventilação mecânica que extraía de forma constante 2,4 l/min de ar do interior da câmara de fluxo.

Assim e comparando o obtido com o ensaio anterior, IH7, observou-se as seguintes variações de pressão vapor, figura 52.

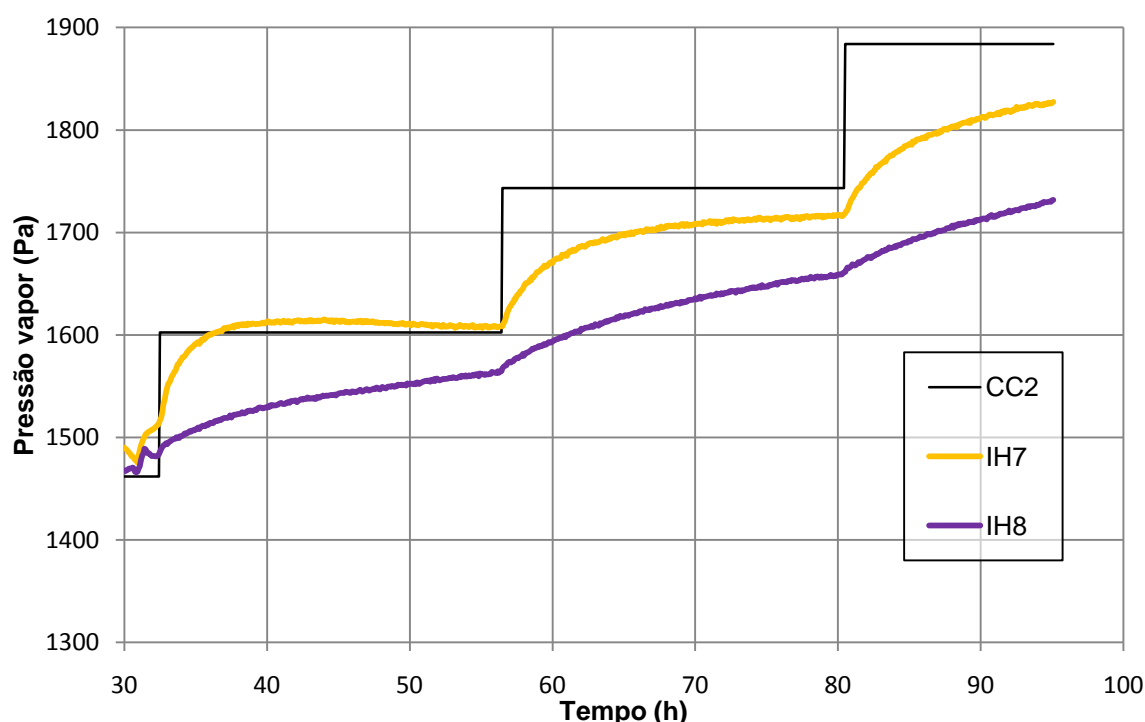


Fig.52 – Ensaio IH8, câmara de fluxo com 0,75 m<sup>2</sup> de GC e N = 0,30 h<sup>-1</sup>, comparação com IH7 e N=0,3 h<sup>-1</sup>

Neste ensaio só foi possível realizar por completo dois patamares, pois uma avaria na bomba impediu o normal desenrolar do mesmo, apesar disso foi possível retirar algumas conclusões dos valores registados.

Assim poderá referir-se que ficou demonstrada a influência da inércia higroscópica com ensaio IH8, visto observarem diferenças de pressão vapor consideráveis comparativamente com o ensaio IH7.

Um outro aspecto visível é a forma das curvas de cada um dos ensaios, assim no IH7, sem inércia higroscópica, verifica-se a estabilização dos valores em cada um dos patamares, o mesmo não se poderá dizer do ensaio IH8.

Deste modo uma das conclusões que se podem retirar é que com inércia higroscópica, a estabilização é mais demorada, isto deve-se ao facto de o material ir absorvendo algum do vapor de água presente retardando a estabilização das condições atmosféricas, isto remete para o princípio básico da inércia higroscópica.

Outra consequência disso é verificar que as maiores diferenças entre as curvas não se vão registar no final do patamar, como acontecia no ensaios com um  $N=0,17 \text{ h}^{-1}$ , mas sim muito mais próximas do início do patamar.

As maiores diferenças relativamente à pressão vapor entre estes dois ensaios são apresentadas no quadro 15.

Quadro 15 – Maiores diferença de pressão vapor entre os ensaios realizados com um  $N=0,30 \text{ h}^{-1}$  em cada um dos patamares de HR analisados

Patamar de HR (%)	Diferenças de Pressão	Humidade Relativa
	IH7-IH8	IH7-IH8
55	89	3,17
60	82	2,92
65	100	3,56

Contrariando um pouco a tendência expectável, verificou-se um decréscimo na diferença de pressão vapor dos dois ensaios entre o primeiro e o segundo patamar analisados, apesar disso e face aos poucos dados possuídos, pode afirmar-se que a tendência será de aumento, como se constata pela diferença de 100 Pa de pressão vapor atingidos no patamar de 65 %.

Em termos médios e para comparar com os ensaios realizados com um  $N=0,17 \text{ h}^{-1}$  é apresentado no quadro 16, as diferenças registadas nos ensaios IH7 e IH8.

Quadro 16 – Estudo comparativo médio da pressão vapor nos ensaios IH7 e IH8

Pressão vapor (Pa)		Diferença de pressão vapor (Pa)	Variação de Humidade relativa (%)
IH7	IH8	IH7-IH8	IH7-IH8
1683,84	1609,31	74,54	2,65

Assim verifica-se que em termos médios a diferença de pressão vapor rondou os 75 Pa e o amortecimento de humidade relativa correspondente foi de 2,65 %, que face aos resultados verificados no quadro 13, denota uma menor influência da inércia higroscópica aquando da utilização de caudais de ventilação maiores.

#### 3.4.4. COMPARAÇÃO FINAL DE TODOS OS ENSAIOS

Visto no último ensaio realizado, apenas ter conseguido atingir por completo o patamar correspondente aos 60% de humidade relativa, ser um pouco mais limitada é apresentada, na figura 53, a reprodução gráfica de todas as curvas obtidas nos ensaios.

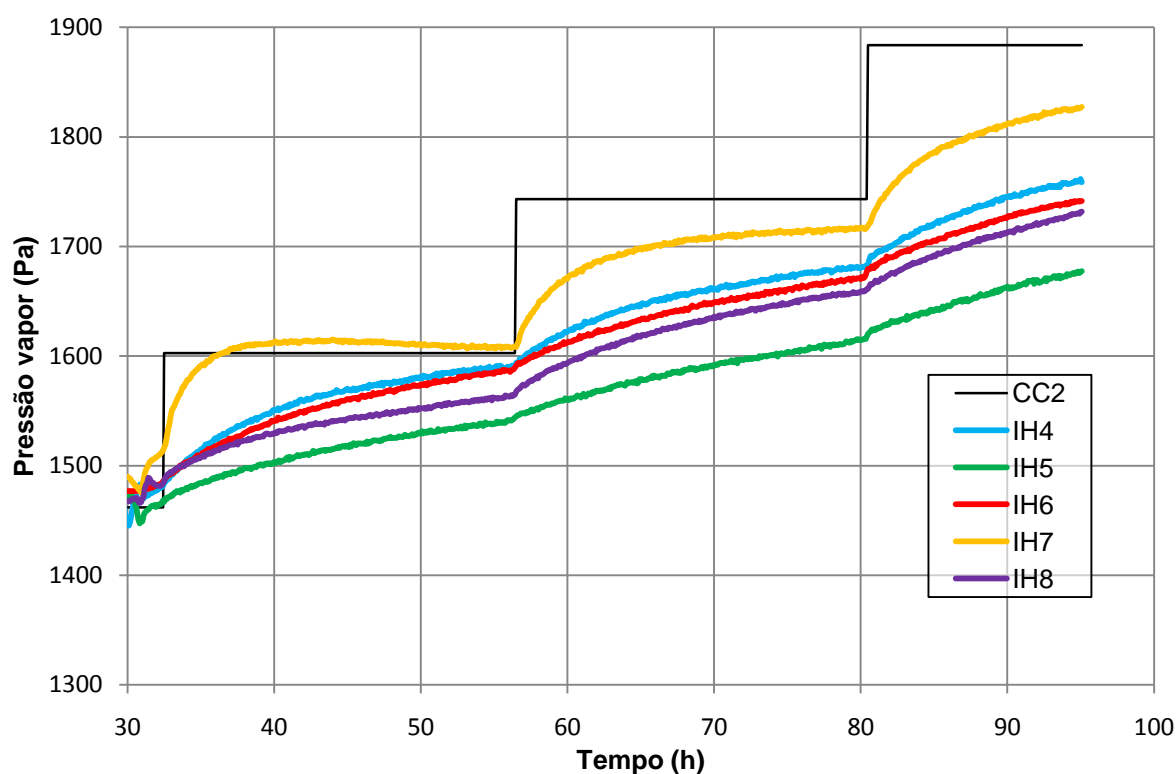


Figura 53 – comparação entre os vários ensaios

Face aos traçados observados podem retirar-se as seguintes conclusões:

- Quanto maior é a área de gesso cartonado no interior da câmara de fluxo maior são as diferenças de pressão registadas, pois os ensaios IH5 e IH8 são os que apresentam os menores valores;
- Uma menor ventilação do espaço torna mais evidente o efeito da inércia higroscópica, a curva correspondente ao ensaio IH5 encontra-se abaixo desta;

### 3.5. ENSAIO DE INÉRCIA HIGROSCÓPICA COM BASE NA VARIAÇÃO DE MASSA DA AMOSTRA

Um outro ensaio foi usado para identificar a inércia higroscópica dos materiais. Tratando-se a inércia higroscópica da capacidade dos materiais reterem e restituírem água ao ambiente, esse ensaio teve como ideia base a variação de massa por volume de amostra,  $\Delta m/e$  ( $\text{g/m}^3$ ).

Nesse sentido foi analisada a variação de massa de quatro provetes cada um deles de um material diferente após sujeito a solicitação usada nos ensaios anteriores, figura 46, subsecção 3.4.1.

Para a realização do ensaio experimental foi usado o seguinte modelo laboratório, figura 54.

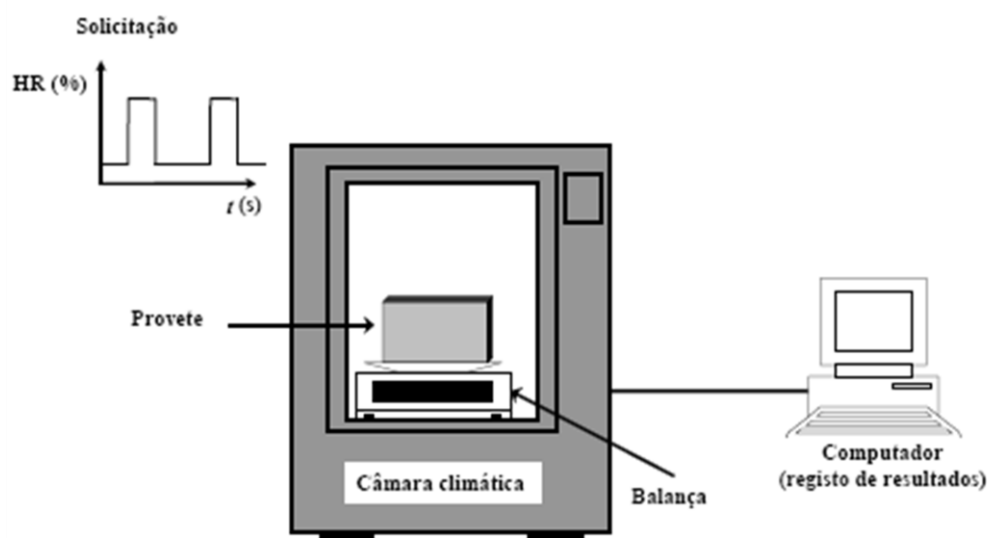


Figura 54 – Modelo de ensaio para comparação de inércia de diversos materiais, segundo a variação de massa

Como material a ensaiar, foi usado o gesso cartonado, GC, gesso projectado, GP, reboco de gesso e cal, GT e uma amostra de madeira de pinho, vistos serem os materiais mais usados como revestimentos interiores.

Cada um dos provetes tinha as dimensões de 0,2 x 0,2, e foram ensaiados efectuando o seguinte método:

- Colocou-se uma balança do tipo Sartorius BP 3100 S com precisão de 0,01 g no interior da câmara climática 2;
- Posteriormente colou-se o provete a ensaiar em cima da mesma;
- Activou-se o programa de ensaio, figura 47, registando-se todos os valores obtidos num computador.

Após a realização de todos os ensaios procedeu-se a um estudo comparativo de todos os valores observados, traçando-se dessa forma o gráfico da figura 55 e 56.

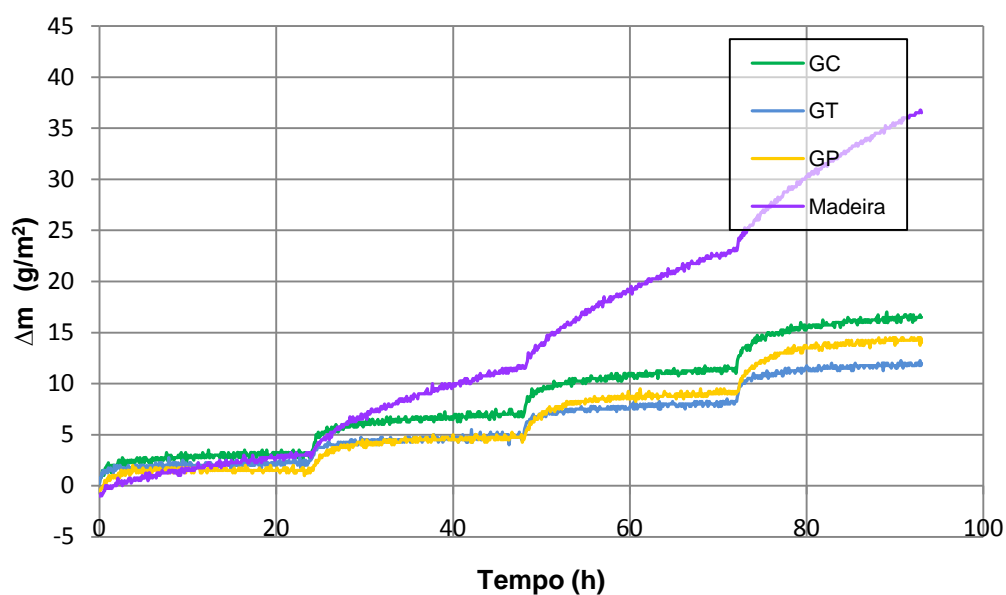


Figura 55 – Gráfico comparativo da variação de massa dos vários materiais

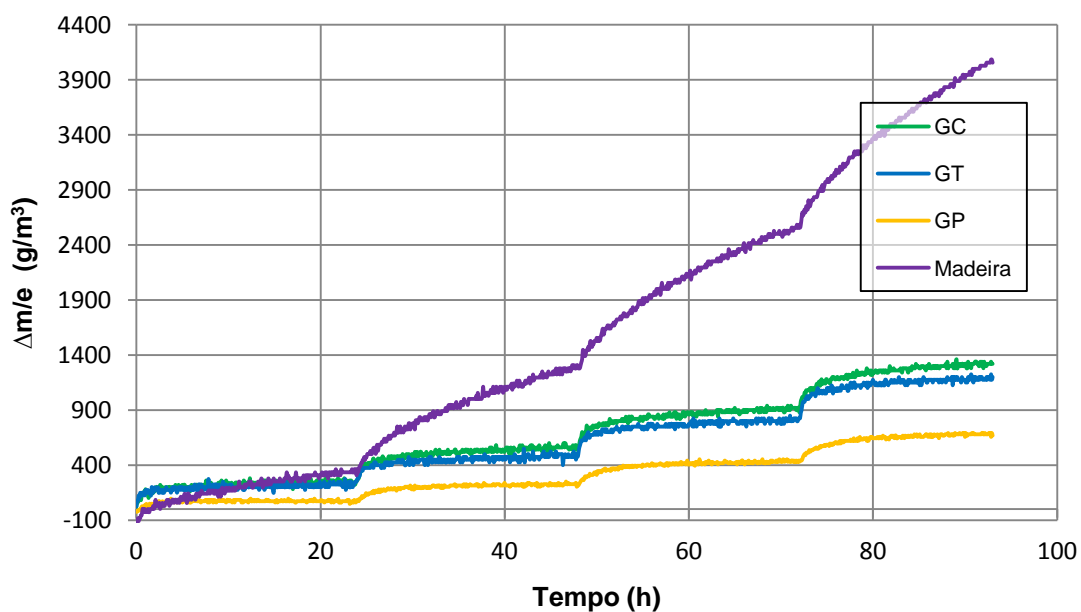


Figura 56 – Gráfico comparativo da variação de massa dos vários materiais, função da espessura dos materiais

Para além disso no quadro 17 estão representados as médias das variações de massa relativos ao período de tempo de análise, assim como em função da espessura do provete.

Quadro 17 – variações médias da massa dos provetes

Material	Média de $\Delta m$ (g/m <sup>2</sup> )	Média de $\Delta m/e$ (g/m <sup>3</sup> )
GC	8,59	687,25
GT	6,19	619,09
GP	6,64	316,01
Madeira	14,52	1613,42

Pela visualização do gráfico é possível referir o seguinte:

- No primeiro patamar, correspondente a 55% de humidade relativa, constata-se uma certa semelhança entre os valores de  $\Delta m$  de cada um dos materiais, na gráfico da figura 56 correspondente a  $\Delta m/e$  já se começa a observar ligeira diferenças entre os mesmos;
- Para no patamar seguinte, 60% de humidade relativa, verifica-se que o  $\Delta m$  da madeira começa a ter um crescimento muito maior do que o verificado para os gessos, o GC apesar de tudo apresenta um  $\Delta m$  ligeiramente superior aos demais gessos;
- Em relação ao  $\Delta m/e$ , e para o mesmo patamar verifica-se já aí a tendência geral para todos os materiais, assim observa-se claramente que a madeira apresenta os maiores valores, destacando-se dos demais materiais, o GC e GT apresentam valores semelhantes enquanto o GP é o que apresenta os valores baixos.
- Em relação exclusivamente ao  $\Delta m$  verifica-se que no último patamar um afastamento das curvas dos diversos gessos, sendo que o GC apresenta valores superiores ao GP e que este apresenta valores superiores ao GT, desta forma verifica-se que as conclusões aferidas serão diferentes das retiradas das curvas  $\Delta m/e$ .
- Uma outra conclusão, que se pode retirar de ambos os gráficos é que para o ensaio previsto se verifica nos gessos a estabilização dos valores em cada patamar de humidade relativa, isto indicia que toda a espessura do material se encontra sob o efeito da humidade relativa presente, esta conclusão não se adequa à madeira.

Esta análise, conjugada com os valores médios apresentados no quadro 17, permite concluir-se que a madeira é dos materiais testados aquele que apresenta uma maior propensão a reter água do ar da ambiência que a contacta.

Relativamente aos gessos e como se verifica diferenças entre as curvas  $\Delta m$  e  $\Delta m/e$  convém referir que são os resultados apresentados  $\Delta m/e$  que se revelam de maior importância e permitem uma comparação entre a capacidade de retenção de água do ar, por parte de cada um dos materiais, pois tem em consideração a espessura dos mesmos. Assim, o gesso cartonado e o reboco de gesso e cal apresentam valores médios próximos, respectivamente 687 g/m<sup>3</sup> e 619 g/m<sup>3</sup>, enquanto o gesso projectado é, sem dúvida, aquele que apresenta menor capacidade de retenção de água apresentando um valor médio de  $\Delta m/e = 316$  g/m<sup>3</sup>.

Desta forma pode dizer-se que a madeira tem uma capacidade de reter água do ar no seu interior 2,5 vezes superior à capacidade do gesso cartonado e do reboco de gesso e cal, e 5 vezes superior à do gesso projectado.

### 3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo começou por ser descrito o modelo experimental idealizado para a realização desta tese de investigação, assim como todo o equipamento necessário para o levar cabo.

Desta forma foi constituído um modelo que permitisse reproduzir as condições de ambiência exterior e interior de um compartimento e para tal foi necessário o uso de duas câmaras climáticas, uma câmara de fluxo, uma bomba de extracção de ar assim como equipamento de registo das condições verificadas no interior da câmara de fluxo, constituído por seis sondas. Os registos destas sondas assim como os registos das condições das câmaras climáticas são armazenados no disco rígido de dois computadores.

Com o fim de testar o equipamento a usar no estudo experimental foram realizados alguns ensaios prévios, e consistiram:

- Na avaliação do sistema de monitorização;
- Na análise da higroscopicidade da câmara de fluxo;
- No teste do sistema de regulação da ventilação;
- Verificação da inércia higroscópica da câmara de fluxo;

Deste modo observou-se que o sistema de monitorização apresentava ligeiras diferenças entre os dados registados a partir da câmara de fluxo e das câmaras climáticas, apesar de tudo podem ser negligenciáveis face ao margem de erro de cada equipamento, sendo a diferença mais notória o registo de 0,5°C por parte da sonda 1 face as restantes. Relativamente à inércia higroscópica e térmica da câmara de fluxo comprovou-se que esta última pode ser desprezável, enquanto a primeira, apesar de não o ser, pouco influencia os resultados obtidos, visto os ensaios decorrem em condições semelhantes. Relativamente ao sistema de ventilação a sua regulação para baixos caudais reveste de pouca precisão, mas apesar de tudo pode conseguir-se uma boa aproximação aos valores pretendidos.

Face aos resultados obtidos, estavam reunidas condições para avançar para os ensaios comprovativos de inércia higroscópica. Desta forma foram experimentadas duas taxas de renovação de ar de 0,17 h<sup>-1</sup> e 0,30 h<sup>-1</sup>.

Para cada uma das taxas de renovação consideradas foram executados ensaios com câmara de climática vazia e ainda com três provetes de gesso cartonado (0,75 m<sup>2</sup> de área total) no seu interior registando os parâmetros de humidade e temperaturas que se verificavam no decorrer de cada ensaio. Para o ensaio correspondente a um N=0,17 h<sup>-1</sup> foi ainda executado um ensaio onde foi inserido apenas um provete de gesso cartonado no seu interior.

Os resultados finais de cada ensaio foram todos comparados em relação às pressões de vapor registadas, ficando demonstrado o efeito inércia higroscópica e chegando-se à conclusão que a mesma é influenciada pela área do material e pelo caudal de ventilação, sendo, deste modo, mais notória para menores caudais de ventilação e maiores áreas de material de revestimento.

Em termos de amortecimento de humidade relativa os resultados seguem em linha todas as conclusões referidas, assim para um N=0,17 h<sup>-1</sup> e com três provetes no interior da câmara de fluxo verifica-se uma variação de 3,5% face às condições de não inércia higroscópica (câmara de fluxo vazia). Este valor é inferior se for usado uma taxa de renovação horária de ar superior (N=0,30 h<sup>-1</sup>) cifrando-se nos 2,7%. E ainda mais inferior se torna se a área foi diminuta (um provete no interior da câmara de fluxo) atingindo um valor próximo dos 1%.

Por fim resta referir o último ensaio executado, relativo à comparação da capacidade de adsorção de vários materiais, aplicando o método da diferença de massa por volume do provete, verificando-se que a madeira de pinho era aquela que conseguia uma maior retenção de água em contradição com o gesso



projectado que apresentava os piores resultados. O gesso cartonado e o reboco de gesso e cal apresentaram um valor médio, para o ensaio em questão, 2,5 vezes inferior ao obtido para a madeira e 2 vezes superior àquele que foi obtido para o gesso projectado.

# 4

## **APLICABILIDADE DO ESTUDO NOS PROJECTOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo será feita alusão a algumas aplicabilidades do estudo, que foi realizado, em projectos de construção civil. Assim serão abordados os temas: arquitectura, sistemas de ventilação e materiais de revestimento.

### **4.2. ARQUITECTURA**

Um das conclusões mais evidentes a retirar do trabalho experimental efectuado, foi que o aumento da área de revestimento influencia o efeito da inércia higroscópica. Assim quanto maior for a área de revestimento menores serão as flutuações humidade relativa.

Posto isso, uma das formas de poder aumentar a inércia higroscópica no interior das habitações passará por aumentar a área de revestimento, e isso poderá ser garantido pelas seguintes formas:

- Aumentar a área de parede, recriando desta forma os espaços, figura 56;
- Aumentar a área do tecto; em semelhança com as paredes.

Uma outra solução pode passar por usar vários materiais de revestimento, logo com inércias higroscópicas diferentes, numa mesma parede ou tecto. Desta forma será aumentada a influência da inércia higroscópica, desde que os novos materiais possuam maior capacidade de adsorção e desadsorção de água.

Na figura 56, estão ilustradas estas duas soluções referidas, mostrando como se podem adaptar a um determinado espaço.

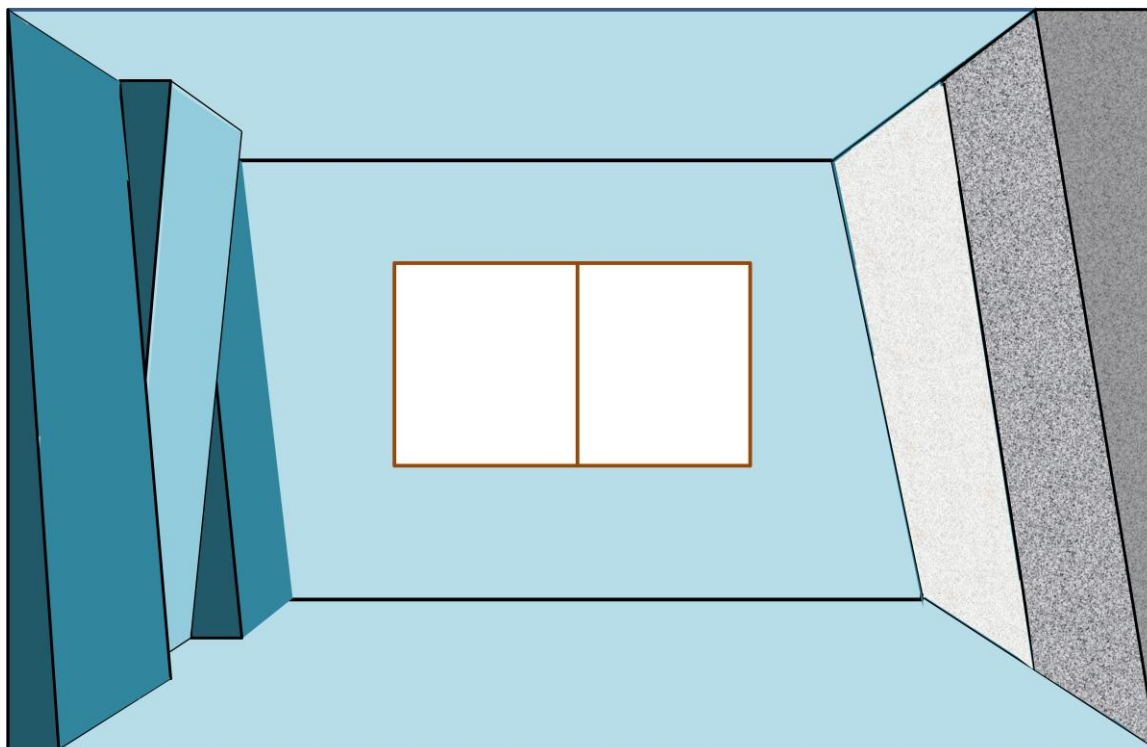


Figura 56 – Solução para aumentar os índices de inércia higroscópica, aumentando a área das paredes e alternando materiais

As formas a dar às paredes podem ser o mais variado possível, a título de exemplo sugere-se a visualização de algumas aplicações realizadas nesse sentido nesse sentido.



Figura 57 – solução para aumentar os índices de inércia higroscópica, aumentando a área das paredes e de tecto [18]

### 4.3. MATERIAIS E REVESTIMENTOS

Este tema também poderá ser abordado aquando das configurações arquitectónicas. Mas nesta secção serão apresentados alguns dos parâmetros que podem influenciar a inércia higroscópica dos, logo numa perspectiva mais técnica de forma a melhor o comportamento higríco de um compartimento.

Desta forma será apresentado no quadro 18, o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água,  $\pi$ , de vários materiais de revestimento.

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material homogéneo representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete desse material, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as suas faces [19], por si só não indica a capacidade de retenção e libertação de água por parte do material, mas permite antever se o material permite a entrada de água para o interior do seu esqueleto sólido.

Quadro 18 – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de alguns materiais [19]

Material	Coeficiente de permeabilidade ao Vapor de água Kg/(m.s.Pa)x10 <sup>-12</sup>
Ardósia	0
Elementos cerâmicos $\gamma=1300$ a $1700$ kg/m <sup>3</sup>	21 a 25
Painéis/Placas de gesso cartonado	17 a 34
Metal	0
Reboco à base de gesso	17 a 38
Betão normal	0,71 a 13
Betão celular	15 a 61 (42)*
Vidro	0
Aglomerado expandido de cortiça	3,0 a 41 (10)*
Pinho	1,5 a 10 (2,6)*

( )\* valores de referência

Os materiais não porosos, como é o caso do vidro metal e ardósia, apresentam um coeficiente de permeabilidade ao vapor de água igual a zero, por isso nunca deverão ser usados como revestimento em locais onde a inércia higroscópica pode ser benéfica.

Os revestimentos à base de gesso são os que apresentam um coeficiente de permeabilidade mais elevado, a par do betão celular, visto isto são materiais que terão uma maior aptidão a captar água e com isso poder amortecer as variações de humidade relativa que possam haver.

Um outro parâmetro, que vem na linha do coeficiente de permeabilidade é a permeância ao vapor de água,  $P_e$ , que corresponde à densidade de fluxo de vapor de água que o atravessa. Este parâmetro torna-se bastante útil para análise dos tratamentos a dar as superfícies de revestimento. Desta forma são apresentadas algumas soluções de acabamento no quadro 19.

Quadro 19 – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de alguns materiais [19]

Material	Espessura da camada de ar de difusão equivalente, $S_d$ (m)	Permeância ao Vapor de água $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \times 10^{-12}$
Esmalte de vinil acrílico (1 camada) $e_{(\text{seca})} = 40\mu\text{m}$	0,38	490
Laca de poliuretano	0,012	15600
Pintura de tinta de borracha $e = 679\mu\text{m}$	1,3	145
Resina epoxy $e = 300\mu\text{m}$	21	8,8
Pintura de tinta “plástica” de acabamento mate aveludado $e = 110\mu\text{m}$	0,026	7200

Um outro parâmetro descrito neste quadro é a espessura de camada de ar de difusão equivalente que representa a espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão de água que o elemento construtivo de espessura,  $e$  [19].

Logo quanto menor for este valor maior será a permeância. Desta forma os acabamentos que permitiriam uma melhor passagem de água para o interior do material de revestimento seria a laca de poliuretano e a pintura de tinta “plástica” de acabamento mate aveludado. Assim a aplicação destes produtos não prejudica tão fortemente a propensão do material a absorver e restituir água ao ambiente, logo não influencia inércia que o material possa ter.

Uma outra propriedade dos materiais que se aproxima mais do conceito da inércia higroscópica é relativa aos ensaios MBV, “Moisture Buffer Value”, que indicam a capacidade de armazenamento e restituição de humidade por parte dos materiais. Na figura 58, estão representados alguns dos valores correspondentes a diversos materiais.

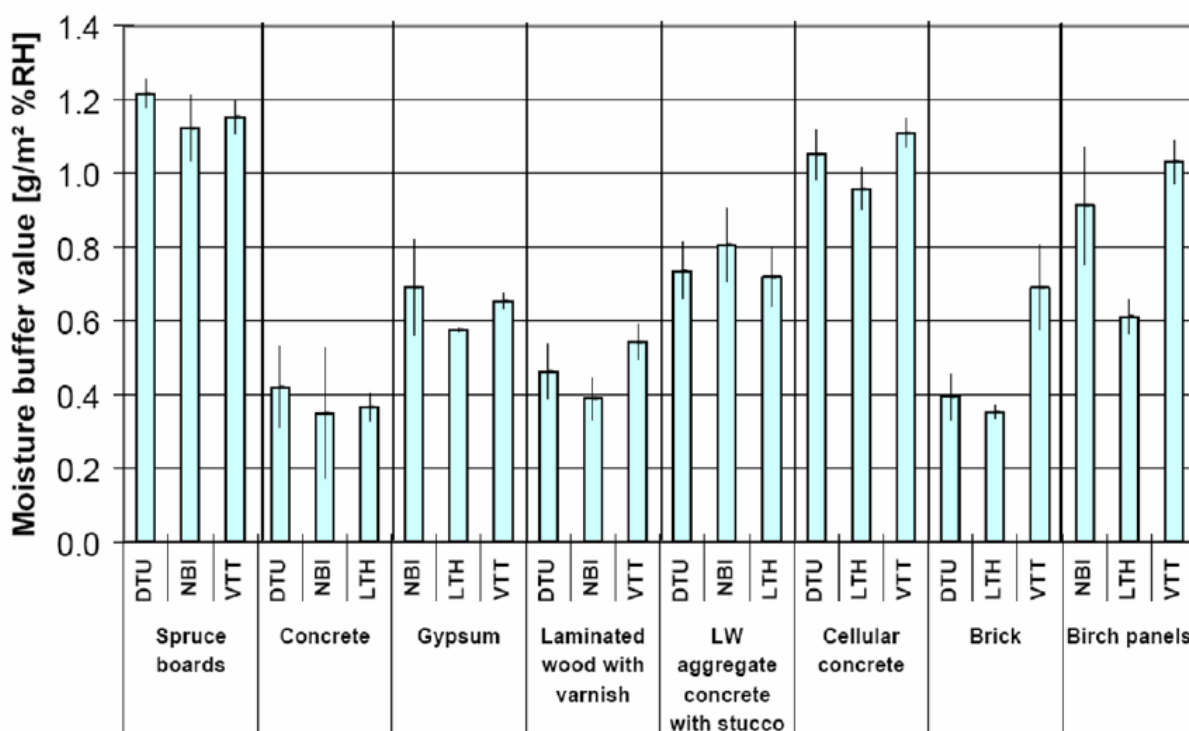


Figura 58 – Gráfico comparativo dos valores de MBV para diversos materiais de construção [20]

Apesar de serem apresentados os resultados de 3 instituições diferentes, os valores obtidos não são muito díspares.

Os materiais que recebem melhor classificação de acordo com este parâmetro são a madeira de abeto e bétula e o betão celular, estes três materiais receberiam a pontuação de bom segundo a nova classificação proposta por Ramos (2007), figura 24.

A pior classificação, dentro deste conjunto de materiais seria a do betão e do tijolo.

Assim e face aos valores observados uma boa solução passaria, por exemplo, pelo uso de madeira de abeto com um tratamento de laca de poliuretano. Uma solução à base de gesso, poderia passar pelo uso de gesso cartonado com pintura de tinta “plástica” de acabamento mate aveludado, apesar de não tão boa poderia apresentar resultados aceitáveis.

#### 4.4. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO

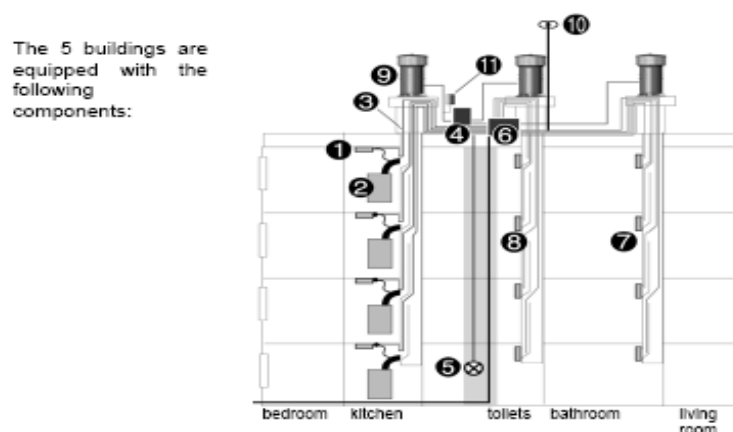
O sistema de ventilação revela-se bastante importante no sentido de renovar as propriedades do ar interior, e aliado à inércia higroscópica poderá ser uma boa solução para controlar as propriedades do ar exterior.

A inércia higroscópica sazonal é influenciada pela taxa de renovação horária como ficou demonstrado com o decorrer desta tese. Assim para renovações horárias baixas a sua influência no controlo do ar é muito mais notória.

Mas em termos de conforto e qualidade do ar esta poderá ser insuficiente para manter os níveis padronizados de aceitabilidade por parte dos utilizadores, principalmente quando existem picos de humidade relativa de curta duração, onde os materiais não têm capacidade imediata para absorver as quantidades de vapor de água produzida.

Nesse sentido é de todo desejável dispor de um sistema que funcione durante os picos de humidade relativa. Deste modo existem sistemas de ventilação que funcionam de forma automática nos momentos de pico [21].

O sistema é composto por uma serie de equipamentos, figura 59, onde como equipamento mais original se destaca as grelhas reguláveis pelos sensores de humidade nelas integradas, figura 60.



	Component	Function
1	Instrumented grille Kitchen	- Acquisition of : Pressure / Burnt gas Temperature / Room temperature / Room Relative humidity. Frequency : each minute.
2	Connected gas appliance	Hot water production for domestic use.
3	Data bus cable	Carry data acquired by components 1,3 and 8.
4	Complete control panel	Transformation of 230 VAC to 15VDC Electrical protection Fan power supply management Simultaneous working of fans management.
5	Working indicator	Indication of good working of the fans equipping this stack of dwellings.
6	Instrumentation box	Registers data acquired by components 1,3 and 8.
7	Instrumented grille bathroom (humidity sensitive grille)	- Acquisition of : Pressure / Grille opening section / Room temperature / Room Relative humidity. Frequency : each minute.
8	Instrumented grille Toilets (humidity sensitive grille)	- Acquisition of : Pressure / Grille opening section / Room temperature / Room Relative humidity. Frequency : each minute.
9	VBP very low pressure fan	Very low pressure fan for passive stack ventilation assistance.
10	Meteorological station	Acquisition of : Wind speed / Wind direction / External local temperature / External local relative humidity. Frequency : each minute.
11	Temperature sensor	Controls the VBP fans speed according to temperature (normal speed / low speed).

Fig.59 – Sistema de ventilação sensível a picos de humidade [21]



Fig.60 – Grelha com sensor integrado de humidade relativa [21]

Em termos de funcionamento este sistema está programado para a seguinte curva de serviço, figura 61, onde se observa que mantém um caudal de renovação horária inferior a  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  enquanto a humidade for inferior a 30%, aumentado este caudal a medida que a humidade relativa também aumenta, até que quando a humidade relativa atinge os 65% volta a estabilizar, mas agora num caudal próximo de  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ .

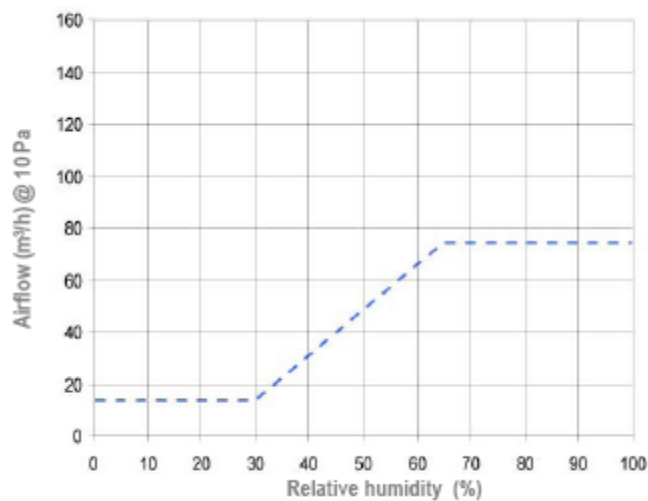


Figura 61 – Curva de funcionamento do sistema [21]

Este tipo de ventilação pode então deste modo ajudar a controlar a humidade, mas com o contributo da inércia higroscópica dos materiais pode melhor ainda mais a sua eficiência assim como garantir consumos energéticos mais baixos.

Hoje em dia a maior parte dos sistemas de ar condicionado comercializados para além da função de regulação de temperatura, dispõem também de sistemas de controlo dos níveis humidade relativa, sejam estes altos ou baixos, logo também poderão ser uma solução.



Posto isto será conveniente proceder a estudo rigoroso de verificação do sistema a implementar na habitação, de forma a potenciar uma boa qualidade do ar interior e um baixo consumo energético, nesse sentido o aproveitamento das características higroscópicas dos materiais será sempre uma mais-valia de custos relativamente baixos comparando com os custos globais de um sistema de ventilação.

#### **4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 4**

Este capítulo teve como principal objectivo preconizar algumas soluções ao nível da arquitectura, ventilação e materiais a fim de fomentar o aumento dos índices de inércia higroscópica do interior das habitações.

Desta a forma as soluções apresentadas consistiram:

- Aumento da área de paredes e tectos, conferindo-lhes para tal formas menos convencionais;
- Conjugação de vários materiais ao nível do revestimento interior;
- Escolha de materiais com índices MBV mais elevados;
- Conferir acabamentos aos revestimentos que apresentem maiores valores de permeância ao vapor;
- Aplicação de sistemas de ventilação de pico de humidade relativa que funcionem de forma autónoma e automatizada.

Todas estas soluções apresentadas podem ser empregues tanto em novos projectos como na revitalização de novos espaços.

# 5

## CONCLUSÕES

### 5.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

O trabalho realizado no âmbito desta tese avaliou e confirmou a influência da inércia higroscópica nas características da ambiência interior dos compartimentos. As conclusões aferidas têm vindo a ser descritas ao longo da mesma. Assim e de forma resumida interessa referir que:

- Os índices de humidade relativa no interior das habitações deverão estar compreendidos entre os 30% e os 50%;
- As consequências da humidade relativa elevada no interior das habitações são a proliferação de fungos e ácaros, responsáveis por problemas de saúde dos utilizadores, deterioração de materiais, conjugada com altas temperaturas influencia a percepção da qualidade do ar assim como o conforto térmico, poderá ter uma influência no consumo energético;
- Relativamente aos baixos índices de humidade relativa estes são responsáveis essencialmente por algumas patologias e irritações dos utilizadores;
- Como maiores influenciadores das condições de humidade do ar interior encontram-se o tipo de actividade que os utilizadores nos compartimentos, o clima exterior e os sistemas de ventilação;
- Relativamente ao clima, e a forma como este pode interferir na inércia higroscópica sazonal, verificou-se que os meses correspondentes à transição estação fria para a estação quente e vice-versa eram os mais influenciadores;
- Quanto ao estudo da inércia higroscópica interessa referir que quanto maior é o caudal de ventilação menor é a influência da inércia higroscópica sazonal;
- Quanto maior é a área de revestimento interior maior é a inércia higroscópica;
- Verifica-se um maior amortecimento dos valores de humidade relativa para maiores áreas de materiais de revestimento e menores caudais.
- A madeira de pinho foi dos materiais testados aquele que apresentou uma maior capacidade de retenção de água seguido do gesso cartonado, sendo o reboco de gesso e cal o que apresentou pior capacidade de retenção de água;
- O modelo experimental adoptado ajusta-se e permite retirar variadas conclusões relativamente à inércia higroscópica sazonal;
- É possível melhorar os índices de inércia higroscópica ao nível de projecto, como por exemplo aumentando a área de parede e tectos interiores;
- Conjuguar materiais de diferentes inércias higroscópica nos revestimentos interiores;

- Seleccionar materiais que apresentem maiores índices de MBV e adoptar acabamentos que tenham maior permeância ao vapor;
- Introduzir sistemas de ventilação que funcionem de forma automatizada e sensíveis aos picos de humidade relativa.

Face às conclusões apresentadas nesta secção é momento de verificar se conseguimos responder as questões levantadas nos objectivos propostos para esta dissertação, desta forma podemos referir que a influência da inércia higroscópica no interior das habitações é considerável relativamente as questões hígricas e que esta pode ser maximizada sendo para tal necessário aplicar matérias de revestimento adequados, proceder à ventilação de picos de humidade relativa e reformular arquitectónicamente paredes e tectos de forma a aumentar a área dos mesmos ou conjugar vários materiais no mesmo espaço.

## 5.2. DESENVOLVIMENTO FUTURO DE INVESTIGAÇÕES NESTA ÁREA

Com o finalizar deste trabalho, e realizado uma introspecção do mesmo, verifica-se que muito mais ainda pode ser feito no sentido de melhor compreender o efeito da inércia higroscópica dos materiais, por isso são apresentados alguns pontos que deveriam ser alvo de estudo com vista a melhorar o conhecimento deste parâmetro:

- Introduzir outras variáveis como por exemplo variar os materiais a testar, verificar o efeito de produção de vapor e aplicar várias gamas caudais de ventilação;
- Realizar um catálogo de matérias com base nos parâmetros  $I_{h,d}$  e AMDR apresentados por Ramos [17];
- Avaliar a forma como inércia higroscópica pode minimizar os caudais de ventilação necessários assim como desenvolver modelos que visem o maior aproveitamento desta característica dos materiais;
- Avaliar dessa forma a influência da inércia higroscópica no consumo energético, que é uma preocupação crescente da sociedade moderna.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Reis, M., Moreira, A. *Propriedades dos Materiais*. Instituto Politécnico de Tomar - Escola superior de Tecnologia de Tomar. [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932\\_PropriedadesMateriais.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932_PropriedadesMateriais.pdf) 15/06/2009.
- [2] Daian, J., Laurent, J. *Structure Poreuse et Transport D'humidite Dans les Roche*. Domaine Universitaire. <http://ltheln21.hmg.inpg.fr/PagePerso/laurent/PDFs/Communications/93Ravello.pdf> 12/05/2009.
- [3] Song, K., Mitchell, J. *Observing Microstructural Evolution During Plaster Hydratio*. Diffusion Fundamentals 08/03/2009, Cambridge.
- [4] <http://www.bygg.ntnu.no/batek/personal/valen/dravh.htm> 29/04/2009.
- [5] <http://paginas.fe.up.pt/sccwww/lfc/Ensaio/curvas.jpg> 29/04/2009.
- [6] Simonson, C., Salonvaara, M., Ojanen, T. *Improving Indoor Climate and Comfort With Wooden Structures*. VTT Publications, Espoo, 2001
- [6] Kosonen, R., Tan, F. *Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index*. Elsevier, 2004. [http://www.halton.com/halton/images.nsf/files/92EFE68CFEBFA878C22571B00025A2DD/\\$file/The rmal%20comfort%20and%20productivity%20-%20Energy%20and%20Buildings.pdf](http://www.halton.com/halton/images.nsf/files/92EFE68CFEBFA878C22571B00025A2DD/$file/The%20rmal%20comfort%20and%20productivity%20-%20Energy%20and%20Buildings.pdf) 12/05/2009.
- [7] Kati, S., Ruut, p., Kimmo, L., Hannu, V., Juha, V., Leena, P., Hanna, I., Tuomo, O., Tomi S. *Mould growth in building materials in laboratory and field Experiment*. Institute of Structural Engineering, Tampere University of Technology, Finland.
- [8] Pernilla, J., Ingemar, S., Annika, E.-T., Kristina, M., Per, I., Eva, S. *Microbiological growth on building materials –critical moisture levels. State of the art*. SP Swedish National Testing and Forskningsinstitut Research Institute. NOV/2005.
- [9] Tuomo, O., Hannu, V., Ruut, P. *MODELLING OF MOULD GROWTH IN BUILDING ENVELOPES*. Annex 41 ST4 – paper Porto 2007 Working meeting. pg 2.
- [10] Jonas, H., SINTEF, B. *Mould growth on board-based wind-barrier products*.
- [11] <http://www.acarex.pt/proliferaacao.htm> 13/05/2009.
- [12] <http://www.spaic.pt/textos/?imr=9&p=&t=41> 13/05/2009.
- [13] Woloszyn, M., Shen, J., A. Brau, M. *NUMERICAL SIMULATIONS OF ENERGY PERFORMANCE OF A VENTILATION SYSTEM CONTROLLED BY RELATIVE HUMIDITY*. CETHIL– UCBL – INSA de Lyon.
- [14] <http://www.furnacehumidifiershop.com/images/whygraph.gif> 13/05/2009
- [15] Boualem, O. *Ventilation and Wall Research House*. CONSTRUCTION INNOVATION Volume 11, Number 4, Dec. 2006. [http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ci/v11no4/v11no4\\_3\\_e.html](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ci/v11no4/v11no4_3_e.html) 14/05/2009
- [16] Ferreira, C. *IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA EM MUSEUS*. Dissertação do grau de mestre em Reabilitação do Património Edificado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008.

[17] Ramos, N. *A IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DOS EDIFÍCIOS*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2007.

[18] <http://www.casadamusica.com/CDMHouse/popup.aspx?channelID=C588ECA9-4A2B-4A07-8D73-B9AFF9BCA861&contentID=E912341D-5259-4829-90F7-0F6BCC8752D8&refreshcache=1>

10/06/2009.

[19] Freitas, V., Pinto, P. *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção – Condensações Internas*. Laboratório de Física das Construções, Porto, 1988.

[20] Carsten, R., Ruut, P., Kurt, H. *Moisture Buffer Value of Materials in Buildings*. Technical University of Denmark. Norden. 2005

[21] Berthin, S., Savin, J.L., Jardinier, M. *Measurements on humidity controlled ventilation systems in 55 occupied apartments*. Aereco S.A., 9 allée du Clos des Charmes, Collégien Marne La Vallée. Abril de 2007